

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

ÉVELIN MOREIRA GONÇALVES

PLANEJAMENTO DE REDE DE MONITORAMENTO VOLTADA PARA O
MONITORAMENTO DE ESTRUTURAS EMPREGANDO-SE LST (LASER
SCANNER TERRESTRE)

CIDADE

2018

ÉVELIN MOREIRA GONÇALVES

PLANEJAMENTO DE REDE DE MONITORAMENTO VOLTADA PARA O
MONITORAMENTO DE ESTRUTURAS EMPREGANDO-SE LST (LASER
SCANNER TERRESTRE)

Dissertação apresentada ao curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Ciências Geodésicas.

Orientador: Prof. Dr. Luís Augusto Koenig Veiga

CURITIBA

2018

Catálogo na Fonte: Sistema de Bibliotecas, UFPR
Biblioteca de Ciência e Tecnologia

G635p

Gonçalves, Évelin Moreira

Planejamento de rede de monitoramento voltada para o monitoramento de estruturas empregando-se LST (laser scanner terrestre) / Évelin Moreira Gonçalves. – Curitiba, 2018.

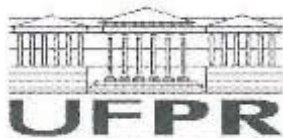
Dissertação - Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências da Terra, Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, 2018.

Orientador: Luís Augusto Koenig Veiga.

1. Barragem. 2. Usinas hidrelétricas. 3. Monitoramento. I. Universidade Federal do Paraná. II. Veiga, Luís Augusto Koenig. III. Título.

CDD: 526.3

Bibliotecária: Vanusa Maciel CRB- 9/1928



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SETOR SETOR DE CIÊNCIAS DA TERRA
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO CIÊNCIAS
GEODÉSICAS

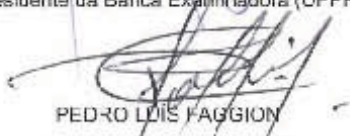
TERMO DE APROVAÇÃO


Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em CIÊNCIAS GEODÉSICAS da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da dissertação de Mestrado de **EVELIN MOREIRA GONÇALVES** intitulada: **PLANEJAMENTO DE REDE DE MONITORAMENTO VOLTADA PARA O MONITORAMENTO DE ESTRUTURAS EMPREGANDO-SE LST (LASER SCANNER TERRESTRE)**, após terem inquirido a aluna e realizado a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO no rito de defesa.

A outorga do título de mestre está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

Curitiba, 31 de Agosto de 2018.


LUÍS AUGUSTO KOENIG VEIGA
Presidente da Banca Examinadora (UFPR)


PEDRO LUIS FAGGION
Avaliador Interno (UFPR)


ALEX SORIA MEDINA
Avaliador Externo (UFPR)

Dedico este trabalho ao Prof. Dr. Luís A. Koenig Veiga sem o qual nenhuma de minhas conquistas acadêmicas teriam sido possíveis.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a minha família, em especial a minha mãe, Nilda, por me apoiarem em todos os momentos.

Ao meu irmão Jorge Felipe Euriques, que sempre esteve ao meu lado, sem o qual nada seria possível.

A todos os amigos do CPGCG que auxiliaram durante o desenvolvimento desta pesquisa.

Aos amigos que fiz ao longo da jornada realizada em Florianópolis.

Aos Professores do CPGCG pelo aprendizado e experiências compartilhadas ao longo deste período.

Principalmente aos Professores Luís A. Koenig Veiga e. Pedro L. Faggion pelas orientações e contribuições para o desenvolvimento dessa pesquisa, e por terem acreditado e confiado em mim ao longo deste período.

Ao Curso Técnico de Agrimensura do Instituto Federal de Santa Catarina - IFSC por ceder a estrutura, os equipamentos, e recursos para realização da pesquisa.

A meus nobres colegas de trabalho Professores e Técnico Administrativo do Curso Técnico de Agrimensura do IFSC, por todo apoio e companheirismo.

A Universidade Federal do Paraná pela oportunidade e a disponibilização de instalações e equipamentos que forem indispensáveis para a conclusão deste trabalho.

“N3o h3 longa noite que n3o encontre o dia.”
(William Shakespeare)

RESUMO

Esta pesquisa tem como objetivo propor um projeto de primeira ordem de uma rede de monitoramento empregando o Laser *Scanner* Terrestre (LST), com estudo de caso para a Usina Hidrelétrica de Mauá (UHE Mauá), localizada no Rio Tibagi, entre os municípios de Ortigueira e Telêmaco Borba no estado do Paraná. De acordo com KUANG (1996), o estabelecimento de uma rede geodésica envolve três estágios: projeto, execução e análise. Este trabalho é voltado para o projeto de uma rede de monitoramento, entendida aqui como a definição da localização dos pontos de controle, voltado ao monitoramento de uma barragem empregando-se o LST. Neste caso, ao invés de pontos objeto, toda a estrutura é monitorada. Sabe-se que, em função da distribuição geométrica dos pontos de apoio e da técnica de levantamento empregada, pode-se determinar através de propagação de variâncias e covariâncias, as precisões estimadas dos pontos medidos. Esta foi a ideia norteadora deste trabalho. Para tanto, foram avaliadas as potencialidades desta tecnologia quando empregada no monitoramento, bem como estudado dos softwares disponíveis que possuem ferramentas para o processamento e análise das observações obtidas com o LST e principalmente definidos critérios mínimos a serem observados desde o planejamento à coleta de dados em campo para obter dados que atendam as prescrições a serem alcançadas no monitoramento. A escolha da localização ótima dos pontos da rede permeou a definição desses critérios mínimos. A proposição de três geometrias diferentes foi realizada por meio em um estudo da área de interesse. Com base nestes dados um modelo tridimensional do barramento da UHE Mauá foi gerado. No modelo foi possível simular amostras de dados para cada rede proposta e aplicar as equações de propagação gerando as incertezas esperadas para os pontos objeto a serem coletados em cada cena, considerando também as incertezas posicionais geradas em função do diâmetro do raio laser usado para a medida. Por fim, foram avaliadas as três propostas de posições para rede do ponto de vista das incertezas e da funcionalidade de coleta de dados em campo e selecionada a rede que melhor atende as expectativas do projeto.

Palavras-chave: Laser Scanner Terrestre. Barragem. Monitoramento. Planejamento de redes geodésicas.

ABSTRACT

This research aims to propose a first order project of a monitoring network employing the Terrestrial Laser Scanner (TLS), with a case study for the Mauá Hydroelectric Plant (UHE Mauá), located in the Tibagi River, between the municipalities of Ortigueira and Telêmaco Borba in the Paraná State. According to KUANG (1996), the establishment of a geodetic network involves three stages: design, execution and analysis. This work is aimed at the optimal design and optimization of a monitoring network, understood here as the definition of the location of control points, aimed at monitoring a dam using the TLS. In this case, instead of object points, the whole structure is monitored. It is known that, according to the geometric distribution of the control points and the surveying technique employed, the estimated precision of the measured object points can be determined by propagating variances and covariates. This was the guiding idea of this work. In order to do so, it was evaluated the potential of this technology when used in the monitoring, as well as studied the available software that have tools to process and analyze the observations obtained with the TLS and mainly it was defined minimum criteria to be observed from the planning to the data collection in field to obtain data that meets the accuracy requirements to be achieved in monitoring. The choice of the optimal location of the control network points permeated the definition of these minimum criteria. The proposition of three different network geometries was performed by means of a study of the area of interest. Based on these data a three-dimensional model of the Mauá Hydroelectric Plant was generated. In the model it was possible to simulate data samples for each proposed network and to apply the propagation equations, generating the expected uncertainties for the object points to be monitored in each scene, also considering the positional uncertainties generated as a function of the diameter of the laser beam used for the measurement. Finally, the three proposals networks were evaluated from the point of view of the uncertainties and the data collection functionality in the field and the network that best meets the expectations of the project was selected.

Keywords: Terrestrial Laser Scanning, Dam, Monitoring of structures, Geodetic networks

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - VARIAÇÃO NA POSIÇÃO DOS PONTOS EM DUAS ÉPOCAS OCORRENDO DEFORMAÇÃO.	25
FIGURA 2 - MODULAÇÃO DO PULSO	31
FIGURA 3 - PERFILAMENTO A LASER.....	33
FIGURA 4 - RELAÇÕES TRIGONOMÉTRICAS	34
FIGURA 5 - ILUSTRAÇÃO DE UM SISTEMA LASER BASEADO EM DISTÂNCIA.	35
FIGURA 6- ANGULOS RELACIONADOS A INCIDÊNCIA DO FEIXE LASER NO OBJETO	36
FIGURA 7 - LEVANTAMENTO DE UMA CENA.....	38
FIGURA 8 - POSIÇÃO E DISTÂNCIA ENTRE CENAS.....	39
FIGURA 9 - ALVOS UTILIZADOS NO LEVANTAMENTO COM LST	40
FIGURA 10 - ETAPAS DE LEVANTAMENTO COM LST	49
FIGURA 11 - RELAÇÕES TRIGONOMÉTRICAS ENTRE O AS COORDENADAS CARTESIANAS E POLARES.....	51
FIGURA 12 - MAPA DA LOCALIZAÇÃO DA UHE MAUÁ	56
FIGURA 13 - POSIÇÕES APROXIMADAS DOS PILARES QUE FORMAM A REDE GEODÉSICA DE MONITORAMENTO DA UHE MAUÁ.....	57
FIGURA 14 - COMPORTAS ABERTAS NA UHE MAUÁ	59
FIGURA 15 – ÁREAS DE RESTRIÇÃO PARA UHE MAUÁ PARA INSTALAÇÃO DE PONTOS DA REDE DE MONITORAMENTO	61
FIGURA 16 - RESULTADO DA COMPARAÇÃO DE NUVENS PARA OS CENÁRIOS 1,2 E 3.	67
FIGURA 17 - RESULTADO DA COMPARAÇÃO DE NUVENS PARA OS CENÁRIOS 4,5 E 6.	69
FIGURA 18 - RESULTADO DA COMPARAÇÃO DE NUVENS PARA O CENÁRIO 7	70
FIGURA 19 - RESULTADO DA COMPARAÇÃO DE NUVENS PARA O CENÁRIO 8	71
FIGURA 20 - RESULTADO DA COMPARAÇÃO DE NUVENS PARA O CENÁRIO 9	71
FIGURA 21 - RESULTADO DA COMPARAÇÃO GEOMAGIC STUDIO.....	73

FIGURA 22 - INTERPOLAÇÃO DAS INCERTEZAS PARA OS CENÁRIOS AVALIADOS EM MILÍMETROS	74
FIGURA 23 - HIPÓTESE 0	76
FIGURA 24 - HIPÓTESE 1	78
FIGURA 25 - HIPÓTESE 2	80
FIGURA 26- MODELO TRIDIMENSIONAL DA BARRAGEM DA UHE MÁUA	82
FIGURA 27 - LOCALIZAÇÃO DOS PONTOS NO MODELO PARA HIPÓTESE 1 ...	85
FIGURA 28 - ISOLINHAS DAS INCERTEZAS PARA HIPOTESE 0 EM MILÍMETROS	87
FIGURA 29 - ELIPSES GERADAS PARA OS PONTOS OBJETO A PARTIR DO PONTO 1 EM MILÍMETROS (HIPÓTESE 0).....	88
FIGURA 30 - ISOLINHAS DAS INCERTEZAS PARA HIPOTESE 1 EM MILÍMETROS	89
FIGURA 31 - ELIPSES GERADAS PARA OS PONTOS OBJETO A PARTIR DO PONTO 1 EM MILÍMETROS (HIPÓTESE 1).....	90
FIGURA 32 - ISOLINHAS DAS INCERTEZAS PARA HIPOTESE 2 EM MILÍMETROS	91
FIGURA 33 - ELIPSES GERADAS PARA OS PONTOS OBJETO A PARTIR DO PONTO 1 EM MILÍMETROS (HIPÓTESE 2).....	91

LISTA DE GRÁFICOS

GRÁFICO 1 - INCERTEZAS MÉDIAS POR PONTOS DAS HIPÓTESES PROPOSTAS.....	92
--	----

LISTA DE QUADROS

QUADRO 1 - EXEMPLOS DE LASER SCANNERS TERRESTRES	45
QUADRO 2 - CARACTERISTICAS DOS CENÁRIOS INICIAIS.....	66
QUADRO 3 - CENÁRIOS SELECIONADOS PARA REPROCESSAMENTO.....	72

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – COORDENADAS DOS PONTOS DA REDE PARA HIPOTÉSE 0	76
TABELA 2 – COORDENADAS DOS PONTOS DA REDE PARA HIPOTÉSE 1	78
TABELA 3 – COORDENADAS DOS PONTOS DA REDE PARA HIPOTÉSE 2	80
TABELA 4 – AMOSTRA DE DADOS SIMULADOS PARA PONTO 1	84

LISTA DE ABREVIATURAS OU SIGLAS

3D	- Que possui três dimensões
CCR	- Concreto Compactado à Rolo
COPEL	- Companhia Paranaense de Eletricidade
GNSS	- Global Navigation Satellite System
LASER	- Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation
LST	- Laser Scanner Terrestre
MVC	- Matriz de variância e covariância
UFPR	- Universidade Federal do Paraná
UHE	- Usina Hidrelétrica

LISTA DE SÍMBOLOS

- © - Copyright
- @ - arroba
- ® - Marca registrada
- Σ - MVC (Matriz de Variância e Covariância)
- Δ - Discriminante de uma função.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	16
1.1 JUSTIFICATIVA	17
1.2 OBJETIVOS	18
1.2.1 Objetivo geral	18
1.2.2 Os objetivos específicos	18
1.3 ESTRUTURAÇÃO	19
2 REVISÃO DE LITERATURA	20
2.1 PLANEJAMENTO DE REDES GEODÉSICAS	20
2.2 MONITORAMENTO DE ESTRUTURAS	24
2.2.1 Monitoramento físico ou geotécnico	26
2.2.2 Monitoramento Geodésico	26
2.3 TECNOLOGIA LASER	28
2.3.1 Princípio de medição de distância a laser	29
2.3.1.1 Intervalo de Tempo (<i>Time-of-Flight</i>)	30
2.3.1.2 Diferença de Fase	31
2.3.1.3 Triangulação	32
2.3.2 Levantamento utilizando Laser <i>Scanner</i>	32
2.3.2.1 Resolução	37
2.3.2.2 Cenas	38
2.3.2.3 Nuvem de pontos	39
2.3.2.4 Alvos	39
2.3.2.5 Fontes de erro do LST	40
2.3.3 Processamento de dados	41
2.3.4 Sistema Laser Scanner Terrestre	42
2.3.4.1 Composição	43
2.3.4.2 Classificação	44
2.4 ESTADO DA ARTE	45
3 MATERIAIS E MÉTODOS	49
3.1 PLANEJAMENTO (PRÉ-ANÁLISE)	49
3.1.1 Pré-análise aplicando o modelo matemático de uma varredura com LST	50
3.2 UHE MAUÁ	55
3.2.1 Rede de monitoramento na UHE Mauá	56

3.2.2 Reconhecimento e identificação da área de interesse.....	58
3.3 DEFINIÇÃO DE CRITÉRIOS PARA PROPOSIÇÃO DA REDE	62
3.4 PROPOSIÇÃO DA REDE PARA UHE DE MAUÁ	75
3.5 SIMULAÇÃO DOS DADOS PARA PRÉ-ANÁLISE	81
4 RESULTADOS	84
4.1 PRÉ-ANÁLISE DAS REDES PROPOSTAS	84
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	94
5.1 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	97
REFERÊNCIAS.....	98

1 INTRODUÇÃO

As grandes estruturas de engenharia estão sujeitas a deslocamentos e deformações com o passar do tempo, se os deslocamentos forem de dimensão superior ao limite de segurança admissível, providências devem ser tomadas para evitar qualquer tipo de danos, sejam de natureza material ou até mesmo humana. Um plano de monitoramento é, portanto, indispensável, não somente durante a fase construtiva, mas também ao longo de toda sua vida útil possibilitando a adoção de medidas mitigatórias que eventualmente se façam necessárias (MONICO, 1988).

O monitoramento de estruturas pode ser realizado através das técnicas ditas físicas ou geodésicas. As técnicas ditas físicas são descritas na literatura como sendo utilizadas para detectar movimentos relativos. Entre os equipamentos empregados pode-se destacar os pêndulos e extensômetros, por exemplo. Já no monitoramento geodésico é possível determinar o deslocamento absoluto de pontos e geralmente é realizado através de técnicas de levantamento de pontos sobre a estrutura a ser monitorada. Dentre essas técnicas as mais tradicionais são a triangulação, trilateração, poligonação, irradiação, nivelamento geométrico e mais modernamente o posicionamento por satélite.

Um método que vem sendo atualmente empregado no levantamento tridimensional de pontos é o escaneamento (varredura ou perfilamento) utilizando o *Laser Scanner Terrestre* (LST), instrumento que permite medir um grande volume de coordenadas tridimensionais de um objeto por meio de emissão de pulsos LASER que são retro espalhados pelo objeto perfilado a necessidade utilizar alvos (SANTIBAÑEZ, 2010).

Porém, algumas características na utilização desta tecnologia são determinantes na qualidade do resultado das coordenadas determinadas, como a resolução dos pontos ao longo da nuvem, divergência do pulso laser, o mecanismo de varredura, a natureza da superfície medida e a posição do equipamento em relação ao objeto a ser medido. As coordenadas dos pontos sobre a estrutura são determinadas indiretamente a partir da observação com um equipamento que possui precisão conhecida para as grandezas medidas, as quais se relacionam com as coordenadas através de um modelo matemático. Conhecendo-se estes elementos (grandezas medidas, suas precisões e o modelo matemático) é possível estimar a precisão das coordenadas através de pré-análise. Desta forma, uma modelagem

tridimensional da área de estudo (barragem e possíveis localizações para a instalação do equipamento), a definição dos modelos matemáticos para o cálculo das coordenadas e aplicação de propagação das covariâncias, pode conduzir a definição de uma rede de monitoramento buscando a melhoria na qualidade dimensional dos pontos observados. No caso dos levantamentos empregando-se LST este posicionamento também terá interferência na capacidade de cobertura do objeto com qualidades mínimas que atendam as especificações de cada projeto. Devem, portanto, ser escolhidas de acordo com critérios que atendam a cada aplicação.

Outro ponto a ser considerado é a necessidade ou não de materialização física das estações de observação, ou onde o LST será instalado. Embora as nuvens de pontos possam ser geradas em épocas distintas através de diferentes posições do instrumento, manter a geometria busca garantir uma repetibilidade de condições de observação, o que no caso de trabalhos de monitoramento, onde dados de épocas diferentes são comparados, tende a ser uma vantagem.

Ao se realizar o monitoramento com o LST, é necessário observar as características das comparações entre nuvens de pontos, quais são as determinações exigidas na coleta de dados para que a identificação de eventuais deslocamentos se torne possível.

Esta pesquisa tem por escopo o projeto de primeira ordem de uma rede de monitoramento baseada na aplicação do LST. Como projeto de primeira ordem entende-se a escolha da melhor localização das estações em função do modelo matemático de determinação das coordenadas, bem como das limitações do método de escaneamento empregando-se o LST, como alcance, ângulo de incidência do feixe laser e obstruções. Pretende-se avaliar, através das características dos dados oriundos deste equipamento e das particularidades exigidas para sua empregabilidade no monitoramento, qual é a melhor geometria para uma rede de monitoramento. Será empregado como estudo de caso a Usina Hidrelétrica de Mauá (UHE Mauá), localizada no Rio Tibagi entre os municípios de Ortigueira e Telêmaco Borba no Paraná.

1.1 JUSTIFICATIVA

O emprego do Laser *Scanner* Terrestre no monitoramento apresenta a possibilidade de uma coleta de dados em grande escala e em um curto período, trazendo a possibilidade não só da detecção de movimentações da estrutura como também de investigações globais a respeito do comportamento temporal da mesma.

Lenartovicz (2013) estudou o emprego de um LST na UHE Mauá onde encontrou algumas dificuldades na aplicabilidade do método devido à topografia da região e obstáculos a jusante da barragem que acabaram impossibilitando a instalação do instrumento em alguns pontos, o que fez com que a comparação entre as duas campanhas realizadas ocorresse em uma região reduzida da barragem. Além disso, constatou que a eficácia na comparação dos dados depende diretamente da densidade de pontos da nuvem o que está diretamente relacionado a posição dos pontos de ocupação com instrumento. Isto ressalta a importância do planejamento de uma rede de monitoramento ótima que permita a melhor configuração dos pontos considerando todos esses limitadores existentes na região e decorrentes do próprio método de observação.

A etapa de pré-análise e os estudos das características específicas no emprego desta tecnologia permite aperfeiçoar os procedimentos de campo reduzindo custo e alcançando os melhores resultados que a metodologia permite.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo geral

Projeto de primeira ordem de uma rede de monitoramento empregando o Laser Scanner Terrestre.

1.2.2 Os objetivos específicos

a) Analisar as características do emprego do LST para o monitoramento de estruturas e estabelecer critérios para aplicação desta tecnologia na região de interesse.

b) Modelar a região do barramento da Usina Hidrelétrica de Mauá, utilizando o material cartográfico disponível da região.

- c) Identificar as áreas onde há impossibilidade de instalação e ocupação com o equipamento.
- d) Propor hipóteses distintas para a geometria da rede a partir de critérios a serem estabelecidos baseados na tecnologia empregada.
- e) Aplicar técnicas de pré-análise da rede de monitoramento, para os cenários propostos considerando o equipamento Faro Focus 3D 120, estabelecendo a configuração ótima para a rede.

1.3 ESTRUTURAÇÃO

Esta dissertação está dividida em cinco capítulos. O primeiro apresenta o tema proposto, objetivos e justificativa. O segundo, uma fundamentação teórica sobre o tema, expondo as principais características da tecnologia laser, do LST e considerações a respeito do planejamento de redes geodésicas de monitoramento. O terceiro apresenta a metodologia envolvida na pesquisa. O quarto apresenta os resultados obtidos e por fim, o quinto capítulo apresenta as conclusões e considerações finais.

2 REVISÃO DE LITERATURA

Neste capítulo apresenta-se uma revisão teórica onde serão abordados os principais temas envolvidos nesta pesquisa e, portanto, relativos ao planejamento de redes de monitoramento geodésico. As características do LST, métodos de funcionamento, sua composição, classificações e as principais fontes de erro do sistema são abordados. Seguido de suas potencialidades e aplicações no monitoramento de grandes estruturas englobando algumas das pesquisas desenvolvidas relacionadas ao tema, por fim o estado da arte.

2.1 PLANEJAMENTO DE REDES GEODÉSICAS

Uma rede geodésica constitui-se de um conjunto de pontos, materializados no terreno, conectados entre si através de observações definidas em relação a um mesmo sistema de referência (SANTOS, 1999).

Torge (2003) classifica as redes geodésicas em três grandes níveis, a saber, redes globais que realizam o Sistema de Referência definido através da convenção internacional, redes nacionais que configuram a base para o levantamento territorial nacional ou continental, as mesmas são as bases para os Sistemas de Informações Geográficas como também das cartas topográficas e temáticas e por fim redes locais que são implantadas principalmente para projetos de engenharia, investigações geofísicas, e determinação de procedimentos geodinâmicos. Esta última tem sua utilização citada em diversos trabalhos como no monitoramento de deformação de estruturas (CHAVES, 2001); na locação de obras de engenharia (PINTO, 2000); na implantação e manutenção de diversos serviços de infraestrutura (IBGE, 1983); no monitoramento de barragens de usinas hidroelétricas (GRANEMANN, 2005); entre outros.

O projeto de implantação uma rede geodésica, tem como propósito obter um conjunto de pontos estáveis e bem definidos associados a coordenadas que atendam a uma determinada precisão. As etapas do projeto de implantação de uma rede vão desde o planejamento (pré-análise), materialização, coleta de dados em campo, até o ajustamento das observações a fim de se estimar as coordenadas dos pontos e associá-las as suas precisões (incertezas). Adicionalmente muitos autores trazem a etapa de controle de qualidade dos resultados (KLEIN, 2014).

A importância de se planejar uma rede geodésica, para posterior implantação, está no fato de que se pretende no levantamento geodésico a obtenção de posições precisas e confiáveis após o ajustamento da rede e ainda, quando possível, reduzir custos para sua execução (OLIVEIRA, 2007). Quanto maior a importância atribuída a etapa de planejamento maior a chance de otimização da rede chegando-se ao objetivo de precisão, confiabilidade e custo reduzido.

Pode-se descrever a otimização de redes geodésicas como sendo um conjunto de procedimentos que conduzam a escolha ótima, no sentido de ideal, dentro de determinados critérios, do sistema de coordenadas que servirá como referência, da localização das estações que a compõem, das observações a serem utilizadas bem como de seus pesos associados, e da necessidade ou não de se melhorar uma rede pré-existente. Um processo de otimização envolve simulações, de natureza numérica ou empíricas conhecidas pelo nome de pré-análise (SANTOS, 1999).

A etapa de pré-análise requer, idealmente, o conhecimento a priori da acurácia das observações, de modo que se possa inferir o quanto as observações, e, por conseguinte, os resultados, irão ser afetados por condições instrumentais e ambientais. Uma análise posterior, possibilita que informações confiáveis sobre as variâncias e covariâncias, de todas as observações coletadas no levantamento, sejam usadas para a estimação dos parâmetros de interesse, bem como na avaliação da qualidade da rede (SANTOS, 1999).

O conhecimento detalhado sobre a rede na fase de planejamento, a identificação e minimização de possíveis falhas antes de qualquer campanha de medição, é parte da otimização do projeto de redes geodésicas, que fornece as informações acerca do trabalho a ser realizado, de tal forma que seja possível projetar e conceber-la melhor (SÁ, 1985¹ *apud* OLIVEIRA, 2007).

O primeiro trabalho relativo ao planejamento de redes geodésicas é atribuído a Helmert (1868), onde o referido autor faz considerações sobre como otimizar um levantamento de campo, por exemplo, visando a localização ótima dos vértices em função do tipo e do número de observações, além disso, destaca a importância dos critérios de precisão e redução de custos a serem considerados nesta etapa (KLEIN,

¹ SÁ, C. C. P. (1985). Otimização de observações em redes geodésicas horizontais. Rio de Janeiro, Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia de Sistemas) – Instituto Militar de Engenharia.

2014). Outros autores como Jung (1924) e Wolf (1961) desenvolveram trabalhos precursores nesta linha, onde consideraram medidas escalares com critérios de precisão e custos, por exemplo, minimizando o traço da matriz de covariâncias das coordenadas dos pontos estimados como critério de precisão e impondo ao planejamento restrições de custo.

Desde então diversos trabalhos sobre o tema foram publicados, e com o aumento significativo de pesquisas relacionadas em 1974, Erik W. Grafarend em seu livro *Optimization of Geodetic Networks*, fez um clássico estudo sobre planejamento e otimização de redes onde propõe uma divisão dos problemas de pré-análise de redes geodésicas em quatro grupos, que ainda hoje é a referência básica para este assunto:

- Projeto de Ordem Zero (*Zero Order Design*): Escolha de um sistema de referência (datum) ideal para a rede geodésica.

- Projeto de Primeira Ordem (*First Order Design*): escolha da localização ideal (ótima) para as estações, ou seja, a determinação de uma melhor configuração para a rede;

- Projeto de Segunda Ordem (*Second Order Design*): escolha dos pesos ótimos das observações;

- Projeto de Terceira Ordem (*Third Order Design*): aprimoramento de uma rede já existente, por meio da introdução de novos pontos ou de novas observações.

Métodos para a solução de projetos de redes de forma otimizada têm sido discutido dentro de todas as esferas, por exemplo, nos trabalhos de Grafarend e Sansó (1985) por programação quadrática e por inversas generalizadas iterativas. Kuang (1996) e Schmitt (1997), dedicaram-se aos projetos de segunda ordem.

São encontrados na literatura alguns trabalhos mais recentes como, Oliveira (2007) e Klein (2014) os quais se ocuparam com as dificuldades de projetar e analisar a confiabilidade das redes geodésicas.

No Brasil alguns autores trazem estudos a respeito dos conceitos, e propostas de metodologias voltados a implantação de redes geodésicas para o monitoramento, como exemplo, Ribeiro (2008), Silva e Romão (2004), Granemann (2005), entre outros.

Uma rede geodésica aplicada ao monitoramento quando bem configurada deve fornecer subsídios para que se possam detectar deslocamentos e deformações

em sua geometria, possibilitando o monitoramento de obras de engenharia, como, por exemplo, pontes, viadutos, edificações, barragens, etc. (GRANEMANN, 2005).

A otimização de redes de monitoramento segue os mesmos princípios gerais definidos por Grafarend, porém com algumas diferenças apontadas por Kuang (1996):

- Projeto de Ordem Zero: nas redes de monitoramento os deslocamentos são determinados a partir de comparações entre coordenadas definidas em duas ou mais épocas distintas, com respeito ao mesmo datum, sendo assim este é estabelecido na época inicial, e cujo movimento nas épocas subsequentes deve ser identificado. Deve-se garantir a estabilidade da rede de referência (absoluta) definida inicialmente nas campanhas futuras, para o caso em que se mantém a posição e orientação com respeito a época inicial.

- Projeto de Primeira Ordem: a forma da rede de monitoramento será, obviamente, função da topografia do local ou da forma da estrutura a ser monitorada e limitações da tecnologia a ser empregada. No entanto, sempre é possível que alguns dos pontos que compõem a rede possam ter suas localizações alteradas, melhorando a configuração da rede, seguindo algum critério de otimização.

- Projeto de Segunda Ordem: O problema relacionado ao projeto de segunda ordem para as redes de monitoramento consiste em se encontrar as acurácias das observáveis, geodésicas ou não, isto é, da matriz peso, que conduzam à determinação dos parâmetros o mais perto possível do ideal para os propósitos do monitoramento, assim a solução do projeto de segunda ordem possibilita a escolha dos procedimentos de medição e observação.

- Projeto de Terceira Ordem: está ligado à melhoria de uma rede de monitoramento existente. Ele pode ser necessário, por exemplo, quando as acurácias associadas aos deslocamentos ou parâmetros de deformação medidos não sejam satisfatórias, ou quando a análise das deformações mostrarem uma tendência incompatível com a realidade. A rede de monitoramento deve, nestes casos, ser estendida por pontos ou observações adicionais, ou até mesmo modificada a disposição de alguns pontos ao logo da estrutura a ser monitorada.

Estas ordens do problema de planejamento embora separadas para classificação estão todas interligadas e interagindo entre si no momento da implantação ou densificação de uma rede. Especificamente, no caso de redes de monitoramento de deformações podemos focar no planejamento vendo as

peculiaridades desse tipo de levantamento (SILVA; ROMÃO, 2004). Como será tratado neste trabalho, devido a topografia da região de entorno das estruturas e limitações das tecnologias aplicadas, há uma série de obstáculos que influenciam na implantação da rede.

Chrzanowski (1981) ² *apud* Santos (1999) distingue dois tipos de redes de monitoramento dedicadas:

- Redes relativas, nas quais os pontos que a compõem estão situados na região sob deformação. A deformação pode ser modelada através de medições repetidas temporalmente;
- Redes absolutas, nas quais alguns ou todos dos pontos se situam fora da região sob deformação, permitindo a determinação dos deslocamentos absolutos dos pontos na área deformável.

De modo geral métodos geodésicos de monitoramento estão atrelados a uma rede de referência absoluta, tendo pontos estáveis fora da zona sob influência de deformação e que permitam a reocupação.

A aplicação da tecnologia LST pode, por limitação de alcance dos equipamentos, gerar a necessidade de se utilizar pontos na região de influência de deformação, o que pode ser controlado com a combinação de outras técnicas geodésicas, como poligonação com estações totais, que permitam a associação e controle destes pontos com relação a outros estáveis fora da zona de deformação.

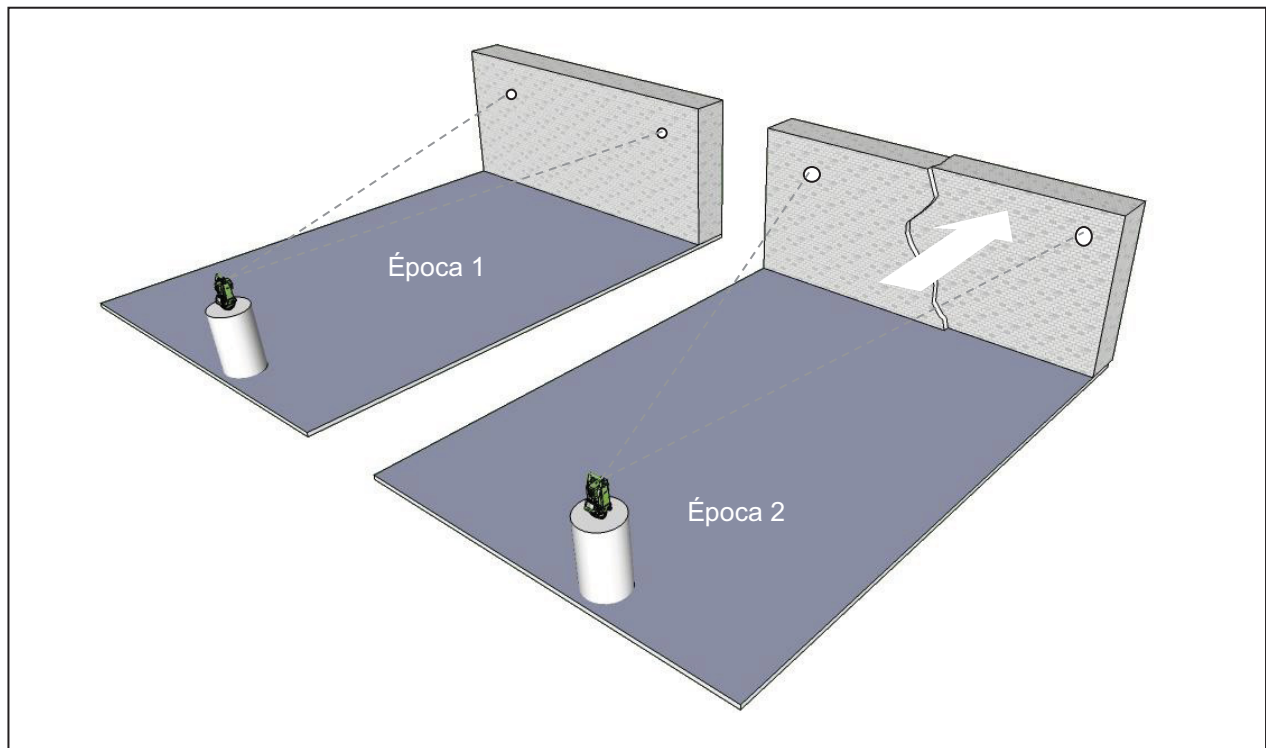
2.2 MONITORAMENTO DE ESTRUTURAS

A Geodésia é a ciência que busca determinar as formas e dimensões da superfície terrestre, bem como variações no seu campo gravitacional. Estas formas e dimensões são determinadas através de técnicas de posicionamento, que permitem determinar a posição espacial de pontos (coordenadas tridimensionais referenciadas a um sistema de referência determinado). Estas técnicas podem ser aplicadas também para a determinação de coordenadas de pontos em objetos ou estruturas.

² Chrzanowski, A. A comparison of different approaches into the analysis of deformation measurements, Proceedings of the XVI International Congress of the Federation of Surveyors, Montreaux, August 9-18, 1981.

Tratando-se de unidades estruturais civis (barragens, pontes, etc. com suas respectivas fundações), a determinação de coordenadas dos mesmos pontos vinculados as estruturas em épocas diferentes, associadas ao mesmo referencial, permite que se acompanhe o comportamento destes pontos ao longo do tempo e desta forma da própria estrutura (FIGURA 1). Na figura 1, os pontos A e B tem suas posições espaciais (coordenadas) determinadas em duas épocas (t_1 e t_2). Na época t_2 o ponto B tem sua posição alterada em função de movimentação e consequente deformação na estrutura (FAGGION et al., 2012).

FIGURA 1 - VARIAÇÃO NA POSIÇÃO DOS PONTOS EM DUAS ÉPOCAS OCORRENDO DEFORMAÇÃO.



FONTE: Faggion et al., 2012.

Denomina-se Monitoramento Geodésico a aplicação de métodos de posicionamento espacial a pontos vinculados às estruturas de forma continuada no tempo. Uma das características importantes deste monitoramento é a possibilidade da determinação de deslocamentos absolutos de pontos, relacionados a um referencial pré-estabelecido.

Além dos métodos de monitoramento geodésicos existem também os ditos não geodésicos que abrangem os métodos físicos ou geotécnicos. Estas são as

duas grandes categorias de monitoramento de estruturas classificadas por alguns autores como Kuang (1984) e Santos (1999).

2.2.1 Monitoramento físico ou geotécnico

Os métodos físicos são utilizados primeiramente para detectar movimentos relativos, fazem uso de instrumentos geotécnicos especializados. Alguns dos instrumentos utilizados nesta metodologia são inclinômetros, piezômetros, análise química e da turbidez da água, pêndulos, medidores de vazão, células de pressão, entre outros.

De acordo com US ARMY (1995) os principais objetivos da instrumentação geotécnica podem ser divididos em quatro grupos distintos: avaliação analítica; previsão de desempenho futuro; avaliação legal e desenvolvimento e verificação de projetos futuros.

Segundo Fernandes (2012) o comportamento de um maciço pode ser acompanhado por diferentes parâmetros, são eles:

- Vazões de percolação;
- Pressão porosa nas fundações;
- Carregamento de partículas através da percolação no maciço da estrutura;
- Atividades sísmicas;
- Deformação de maciço e fundações;
- Empuxos de terra sobre estruturas de concreto e,
- Tensões no aterro.

2.2.2 Monitoramento Geodésico

Os métodos geodésicos de monitoramento determinam os deslocamentos absolutos de pontos de interesse em relação a outros pontos localizados fora da área de influência do corpo deformável (FERNANDES, 2012). Que estão, portanto, atrelados a uma rede de monitoramento absoluta.

Estes métodos são usados para o controle da magnitude e variação temporal dos deslocamentos horizontais e verticais de estruturas. Nos projetos que tratam da metodologia clássica para monitoramento geodésico, os deslocamentos horizontais são determinados de maneira independente das verticais. Há, no

entanto, uma tendência de coleta de desses dados de maneira simultânea, com o surgimento de novas tecnologias como GNSS, *Laser Scanner* e estações totais.

O monitoramento geodésico é uma ferramenta fundamental no controle de deslocamentos absolutos em grandes obras de engenharia. Nas barragens, em conjunto com a instrumentação física de monitoramento constitui-se do subsídio para a análise de comportamento da estrutura como elemento auxiliar na prevenção de acidentes (GRANEMANN, 2005).

CHAVES (2001) destaca algumas das principais vantagens dos métodos geodésicos:

- Fornecem o estado global de um corpo deformável;
- Contém métodos próprios de verificar os resultados e são capazes de avaliar a exatidão da medição globalmente;
- Fornecem versatilidade e adequabilidade para qualquer meio-ambiente e situação de operação.

Os métodos geodésicos usualmente utilizados no monitoramento de deformações, vem sendo tratados pela literatura por diversos autores, como exemplos podemos citar: Santibanez (2010), Santos (2015) e Lenartovicz (2013).

Santibanez (2010) avaliou a influência da quantidade de pontos coletados num levantamento com LST e o método de ajustamento utilizado na representação paramétrica de superfícies planas como ferramenta para o controle de deslocamentos de estruturas, onde conclui, entre outras coisas, que a quantidade de pontos utilizados na representação paramétrica de uma superfície plana tem uma grande influência na precisão e medição de deslocamentos, existindo uma rápida melhora nas precisões alcançadas quando a densidade de pontos aumenta.

Santos (2015) estudou a aplicação do LST ao monitoramento da formação de terraços lamosos em estuário de macro maré, Rio Araguari, Costa Amazônica Brasileira, onde foram realizados dois levantamentos usando *laser scanner* em intervalo temporal de cerca de um ano utilizados para gerar modelos digitais de elevação que quando comparados revelaram uma mudança no perfil altimétrico de 3,028 / -1,327 metros em setembro de 2012 para 2,109 / -0,297 metros em novembro de 2013.

Lenartovicz (2013) averiguou o emprego de um LST para o monitoramento de barragens através do estudo do levantamento realizado na Usina Hidrelétrica de

Mauá em duas diferentes épocas durante a formação do reservatório. Em seu trabalho é apontado que, o ângulo de incidência do feixe laser, e a distância do equipamento são fatores determinantes na precisão dos dados levantados.

Visando compreender esses aspectos Lenartovicz (2013) realizou um experimento em que selecionou regiões da nuvem coletada com o LST e buscou as maiores distâncias encontradas entre os pontos dessa região, ou seja, as piores resoluções. Foram encontrados espaçamentos de pontos de 2 centímetros na região central da nuvem e mais próxima do LST, observou-se que este valor crescia proporcionalmente com a redução do ângulo de incidência do pulso laser e do aumento da distância entre o LST e a região levantada, atingindo espaçamentos superiores a 35 centímetros. Chegando à conclusão de que para a região estudada, as comparações entre as campanhas foram melhores nas áreas onde o ângulo de incidência do pulso foi superior a 45° .

Segundo Van Genechten et al. (2008) se o ângulo entre o feixe laser e a superfície do objeto diminui, sua intensidade também é reduzida. Isso pode ocasionar falhas ou falsos resultados no levantamento de pontos. Ainda, a acurácia na mensuração de posição diminui na medida em que o feixe laser não está perpendicular com a superfície e a área de projeção do laser é ampliada.

2.3 TECNOLOGIA LASER

A concepção primária do laser surgiu por volta de 1905, quando Albert Einstein sugeriu que os átomos das fontes de luz fossem estimulados artificialmente para emitir fótons, esta emissão estimulada iria produzir uma fonte de luz altamente concentrada (NASCIMENTO JÚNIOR et al., 2006).

A palavra LASER é um acrônimo de *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiance* que pode ser traduzido como Ampliação da Luz através da Emissão Estimulada de Radiação.

Basicamente, um laser é um dispositivo óptico que produz e emite um feixe ou pulso de radiação monocromática através da emissão estimulada, por meio de uma fonte de energia externa, para desencadear uma ação em cascata entre as partículas de luz, assim ele é capaz de fazer com que todas essas partículas tenham o mesmo comportamento e se propaguem em uma mesma direção.

Shan; Toth (2008) aponta que todo laser é constituído de três principais elementos:

- Material de ativação, cujos elétrons serão excitados e elevados a um nível de energia mais alto, através da utilização de uma fonte de energia, que pode ser sólido, líquido, gasoso ou semiconductor;
- Fonte de energia, que fornece a energia para iniciar e manter a emissão do laser, por exemplo, fontes ópticas e unidades de energia elétrica;
- Conjunto de dois espelhos, composto de um espelho totalmente refletor e outro semi-refletor.

Um dos primeiros modelos construídos de *laser*, foi composto por uma barra de cristal de rubi que é excitada por uma lâmpada a gás. Numa das extremidades há um espelho parcialmente refletor e na outra, um com 100% de reflexão.

Normalmente o laser é classificado segundo o tipo de material empregado na sua geração, usado como fonte da radiação. Alguns exemplos são: os lasers a gás; de estado sólido, semiconductor; *excimer* e de corantes.

Nos últimos anos essa tecnologia tem sido utilizada em diversas áreas, em especial nas ciências geodésicas, onde podem ser encontrados trabalhos de engenharia que utilizam desde estações totais à equipamentos *Laser Scanner*, aplicados em mapeamentos topográficos, levantamentos de linhas de transmissão, rodovias, ferrovias, monumentos históricos, sítios arqueológicos, monitoramento de grandes estruturas, controle de qualidade na indústria, entre outros (NASCIMENTO JÚNIOR; SCHULER; CAVALCANTE, 2006).

2.3.1 Princípio de medição de distância a laser

Mensurações de distância a laser são realizadas utilizando laser de estado sólido e semicondutores (SHAN; TOTH, 2008), onde altos níveis de energia são utilizados.

A concepção básica trata-se da medida do tempo necessário para que um pulso de laser viaje do transmissor até a superfície refletora e de volta ao receptor.

O feixe luminoso emitido pelo equipamento viaja através da atmosfera e interage com o objeto alvo. Os átomos e moléculas constituintes do alvo refletem ou absorvem a radiação eletromagnética e seu retro espalhamento dá origem à

detecção remota do laser (WEITKAMP³, 2005 *apud* PAVI, BORDIN, VERONEZ, 2014).

Para tal, existem diferentes princípios de funcionamento do dispositivo, dentre os quais podem ser citados como principais: método do intervalo de tempo (*time-of-flight*), onde a distância é calculada através da medição precisa do tempo entre a emissão e o retorno do pulso; método da diferença de fase, onde a distância é calculada através da diferença de fase da onda modulada; e o método da triangulação simples, com equipamentos utilizando câmeras CCD (*Charge-Coupled Device*) (BOEHLER, 2001; SHAN e TOTH, 2008 e LENARTOVICZ, 2013).

2.3.1.1 Intervalo de Tempo (*Time-of-Flight*)

Este princípio baseia-se no intervalo de tempo decorrido desde o instante da emissão do pulso até o instante do registro da parcela refletida deste pulso pela superfície. O princípio do cálculo da distância através do intervalo de tempo envolve a mensuração do tempo decorrido entre a emissão de um pulso, sua reflexão em um objeto, e seu retorno ao sensor. Onde o tempo (Δt) que o sinal leva para ir do transmissor ao objeto e retornar ao sistema é medido e usado para calcular a distância (D) sensor-objeto utilizando-se a velocidade da luz ($c \approx 300 \times 10^3$ km/s). A constante $\frac{1}{2}$ é utilizada, pois é considerado o tempo de ida e de volta do sinal (Equação 1) (LICHTI e HARVEY, 2002).

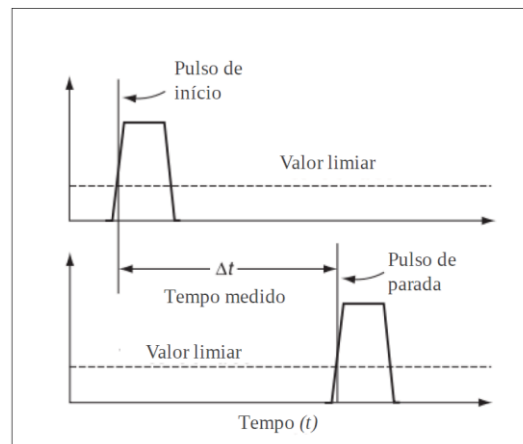
$$D = \frac{1}{2} \cdot c \cdot \Delta t \quad (1)$$

A eficiência deste método está relacionada ao sistema de medição de tempo, que pode ocorrer através de um sistema chamado modulação de pulso. Onde, parte da energia do pulso laser emitida é desviada por um espelho para um fotodiodo, que emite um sinal e aciona um dispositivo de contagem de tempo. Este acionamento é realizado quando o pulso atinge um valor de ativação. Após o retorno

³ WEITKAMP, C. Lidar: range-resolved optical remote sensing of the atmosphere. New York: Springer. 2005. 455 p

do pulso, refletido por algum objeto, parte de sua energia é desviada para outro fotodiodo, que envia um sinal e cessa a contagem (SHAN; TOTH, 2008).

FIGURA 2 - MODULAÇÃO DO PULSO



FONTE: Shan e Toth, 2009 *apud* Lenartovicz, 2013.

O instrumento registra o tempo, a intensidade da energia refletida pelo objeto e os parâmetros de atitude do feixe, que são coordenadas polares do ponto em relação ao referencial do equipamento. Com estes dados obtém-se as coordenadas cartesianas 3D dos pontos medidos, resultado da transformação das coordenadas polares em retangulares através das distâncias e direções geradas pelo sensor (TOMMASELLI, 2003).

Exemplos de equipamentos baseados nessa técnica são os LSTs Leica HDS4400, Riegl VZ-4000 e do Optech ILRIS-LR, que possuem alcance máximo de 700 m, 4.000 m e 3.000 m respectivamente. O benefício de longos alcances implica em razoável acurácia (BEIRÃO, 2011).

2.3.1.2 Diferença de Fase

Nestes equipamentos, a distância é calculada através da determinação precisa da diferença de fase, entre a onda transmitida e refletida, da parte fracionada do comprimento total. Este princípio de funcionamento é utilizado em equipamentos onde a radiação do laser é emitida como um feixe contínuo. É principalmente utilizado para medidas em curta distância. Nestes equipamentos o feixe transmitido

compreende um sinal portador no qual um sinal modulador foi sobreposto para controlar a amplitude da onda portadora, um processo chamado modulação de amplitude. Este sinal modulador ou onda de medição é emitido, e mantido em um valor constante, por um oscilador de frequência (SHAN; TOTH, 2008).

2.3.1.3 Triangulação

No método da triangulação as distâncias são determinadas indiretamente através de medidas de ângulo, ou seja, são obtidas através da triangulação simples. Os sensores laser por triangulação são compostos por uma fonte laser de estado sólido e um sensor CCD, CMOS (*Complementary metal-oxide-semiconductor*) ou PSD (*Position Sensing Detector*). Um feixe laser é emitido pelo sistema, com o ângulo de emissão conhecido, em direção ao objeto a ser medido. Uma porção do feixe é então refletida pelo objeto na direção de um ou mais sensores do sistema. Dependendo da distância do objeto o feixe refletido atinge o sensor em diferentes ângulos, e esses são registrados pelo sistema (LENARTOVICZ, 2013).

Este método tem limitações de distâncias, como apontado por Pfeifer e Briese (2007), a qualidade da intersecção diminui com a distância, portanto, este tipo de *scanner* tem sua utilização restrita a intervalos de um ou de poucos metros.

Ainda segundo Pfeifer e Briese (2007), a precisão é normalmente melhor do que ± 1 milímetro. O método descrito não realiza medidas ponto a ponto, mas sim sequenciais de pontos ao longo do objeto de interesse. O número de pontos depende, entre outros fatores, da resolução da câmara.

2.3.2 Levantamento utilizando Laser Scanner

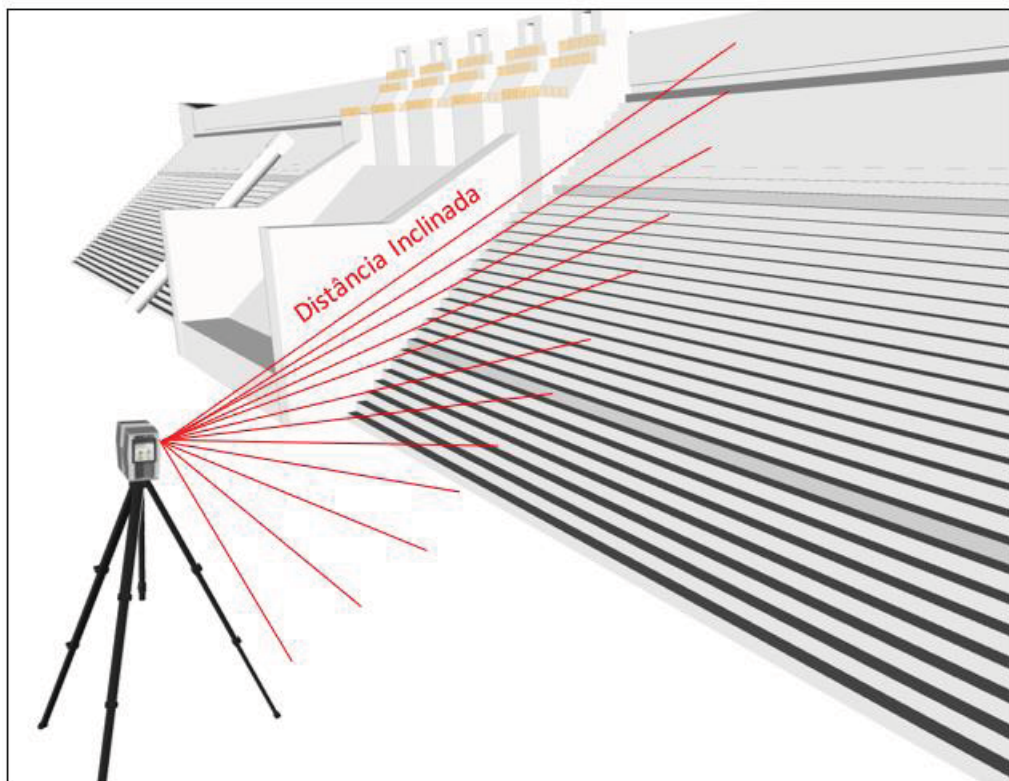
Independente do princípio de funcionamento do dispositivo para medição de distâncias, o equipamento laser *scanner* é um instrumento que permite obter coordenadas tridimensionais de pontos sobre uma superfície através da medição destas distâncias associadas às direções horizontais e ângulos verticais.

Estes dados são amostrados da superfície de um ambiente ou objeto que é reconstituído em ambiente computacional onde é possível coletar informações sobre a métrica e construir desenhos bidimensionais ou modelos tridimensionais.

De acordo com Lima (2008), distintas técnicas e sistemas podem ser empregados, variando com sua finalidade. Entre as técnicas mais comuns estão o perfilamento (*laser profiling*) e a varredura (*laser scanning*), que podem ser terrestres (*ground-based* ou *tripod-mounted*), aéreas (*airborne*) ou mesmo espaciais (*spaceborne*).

Perfilamento a laser é a mensuração de uma série de pontos localizados um ao lado do outro ao longo de uma linha no terreno ou objeto de interesse, formando um perfil bidimensional que mostra as elevações do terreno ao longo desta linha (LENARTOVICZ, 2013). A FIGURA 3 exemplifica um perfilamento realizado com LST, representando as distâncias inclinadas (D_i) entre o equipamento e os pontos no objeto.

FIGURA 3 - PERFILAMENTO A LASER



Fonte: A autora, 2018

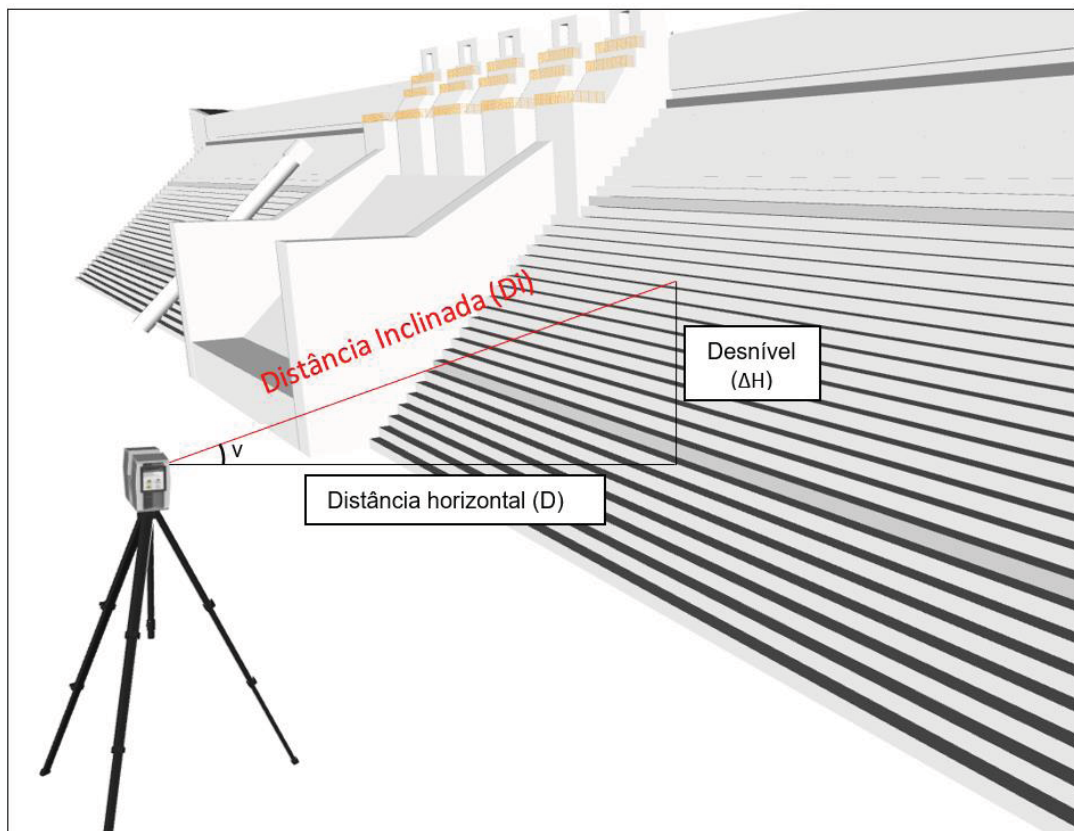
O levantamento do perfil do terreno é feito através de várias medidas de distância inclinada (D_i) e ângulos verticais (v) para cada ponto, que será armazenado digitalmente. A distância horizontal (D) e o desnível (ΔH) entre o equipamento e os pontos no terreno são determinados utilizando os dados

levantados e empregando as Equações 2 e 3 respectivamente, derivadas de relações trigonométricas do triângulo retângulo (SHAN; TOTH, 2008). A FIGURA 4 demonstra essas relações para um ponto medido.

$$D = D_i \cdot \cos(v) \quad (2)$$

$$\Delta H = D_i \cdot \sin(v) \quad (3)$$

FIGURA 4 - RELAÇÕES TRIGONOMÉTRICAS



Fonte: A autora, 2018.

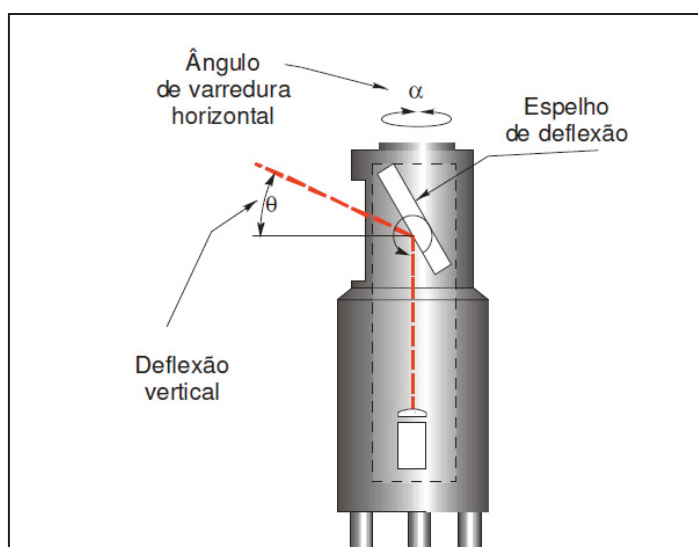
Na varredura a laser prevalecem as relações trigonométricas descritas acima, no entanto agora, as distâncias são coletadas por um laser associado a um servo motor com um espelho de varredura que direciona o raio do laser em angulações, que são registradas por uma unidade de processamento.

A principal vantagem da varredura a laser é a possibilidade de se coletar um grande número de pontos precisos em um período relativamente curto de tempo.

A varredura a laser trata-se, portanto de uma evolução da tecnologia de mensuração a laser, feita através da adição de um espelho ou prisma rotativo aos

instrumentos de perfilamento a laser tanto aéreos como terrestres, portanto o equipamento passa a realizar medições de feições topográficas de áreas e não mais de perfis (LENARTOVICZ, 2013). A FIGURA 5 ilustra um sistema laser e seu espelho de deflexão. A deflexão vertical do raio laser realizada pelo espelho, em conjunto com o ângulo de varredura horizontal α e a distância medida com o laser permitem determinar as coordenadas de pontos sobre a superfície dos objetos (REISS, 2007).

FIGURA 5 - ILUSTRAÇÃO DE UM SISTEMA LASER BASEADO EM DISTÂNCIA.



FONTE: Riegl Instruments, 2006.

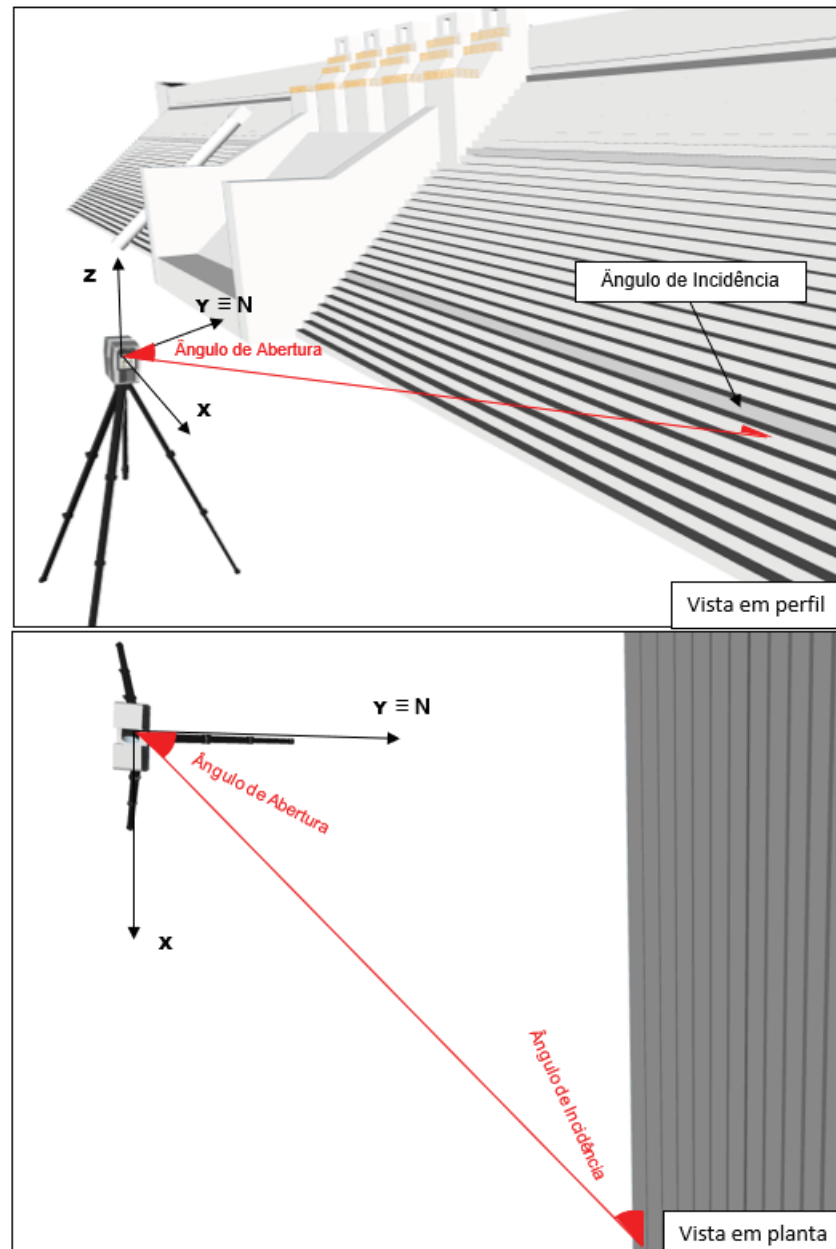
Nesse sistema é adicionada uma movimentação controlada na direção azimutal além do movimento vertical gerado pelos espelhos ou prismas. Esta movimentação geralmente é implementada através da utilização de um motor, permitindo a realização de uma série de perfilamentos em torno do eixo vertical do instrumento.

Estes valores são utilizados pelo equipamento para obter as coordenadas tridimensionais. Considerando que apenas estas coordenadas são armazenadas pelo equipamento, as análises de qualidade das medições angulares devem ser derivadas a partir das coordenadas cartesianas de maneira indireta.

A acurácia angular depende dos erros de posicionamento do dispositivo de rotação e a precisão do dispositivo de medição angular. A variação angular decorrente da varredura através da rotação dos espelhos que gera diferentes ângulos de incidência do feixe laser ao longo do objeto medido. Esta variação tem

relação direta com a resolução da nuvem de pontos, já que o ângulo de incidência do feixe laser é o ângulo formado entre o feixe o objeto escaneado, e quanto menor esse ângulo maior o espaçamento entre os pontos, logo menor a resolução espacial (FIGURA 6).

FIGURA 6- ANGULOS RELACIONADOS A INCIDÊNCIA DO FEIXE LASER NO OBJETO



Fonte: A autora, 2018.

2.3.2.1 Resolução

Um dos principais aspectos que caracterizam uma varredura a laser é sua resolução espacial. A resolução de um LST está associada à sua capacidade para detectar pequenos objetos ou parte de objetos na nuvem de pontos. Tecnicamente, dois fatores contribuem para esta capacidade: o menor incremento possível do ângulo entre dois pontos sucessivos e o tamanho da projeção do raio laser no objeto (BOEHLER et al, 2001).

A resolução pode ser definida como a distância entre dois pontos medidos subsequentes o que determina a densidade de pontos na nuvem de pontos. É importante ressaltar que a precisão e a resolução dos dados obtidos com o LST, são dois conceitos distintos que definem aspectos diferentes do processo de varredura, embora exista uma relação entre ambos.

A quantidade de pontos medidos pode variar de acordo com a aplicação e a capacidade do instrumento, quanto maior a quantidade de pontos por área menor o espaçamento entre eles e, portanto, melhor a resolução espacial (BOEHLER et al, 2001).

Quanto maior a resolução escolhida, mais pontos serão escaneados o que acarreta em um aumento no tempo na coleta de dados, no volume de dados a serem processados e possivelmente nos ruídos gerados nos dados.

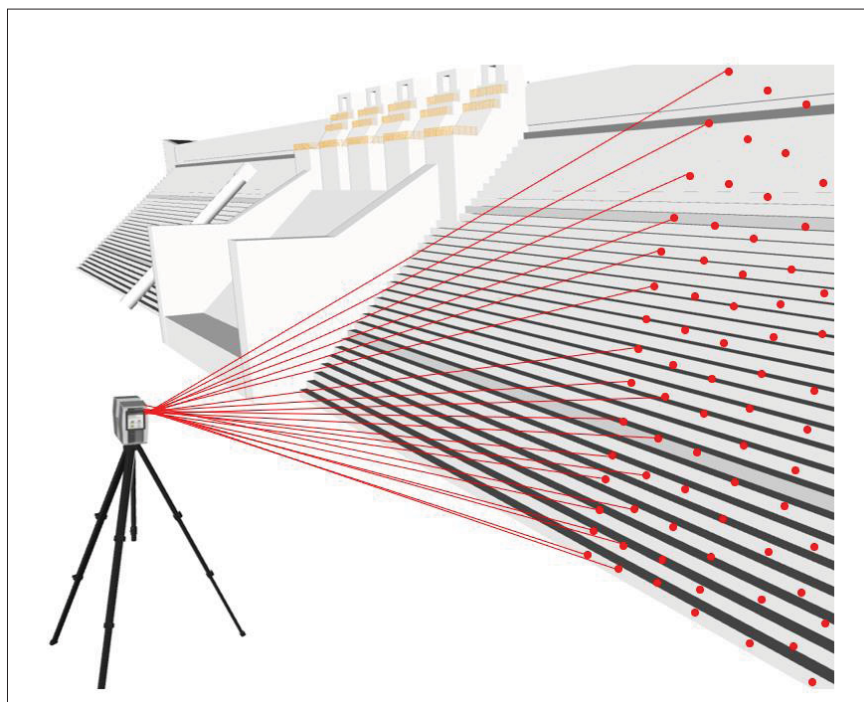
Existem no mercado equipamentos que permitem variar a resolução dos levantamentos entre um milímetro a alguns centímetros. O LST Faro Focus 3D X13, por exemplo, traz opções que vão de 1,534 mm à 30,680 mm em 10 metros. Estas especificações se referem a região central da nuvem e a uma distância específica entre o equipamento e objeto, ao se afastar do centro da nuvem o espaçamento entre os pontos é progressivamente maior.

LENARTOVICZ (2013) utilizou um LST ScanStation C10 da marca Leica para realizar um experimento do qual concluiu que com a distância entre o LST e o objeto de 23,45m, com ângulos de abertura próximos a zero, a média para os valores de espaçamento entre pontos da nuvem foi de aproximadamente 2,3 cm. Na região com ângulo de abertura de 75° onde as distâncias medidas foram de 89,803 m o espaçamento passou a ser de 35,7 cm. Estes resultados ressaltam a importância da escolha da localização de cada cena no levantamento.

2.3.2.2 Cenas

A FIGURA 7 ilustra uma varredura utilizando um LST, a partir de um único ponto de instalação. No entanto, em alguns casos, uma única instalação não é suficiente para recobrir toda a área de interesse. Nesses casos são feitas várias instalações do instrumento, onde em cada ponto é realizada a tomada de dados, formando as chamadas cenas.

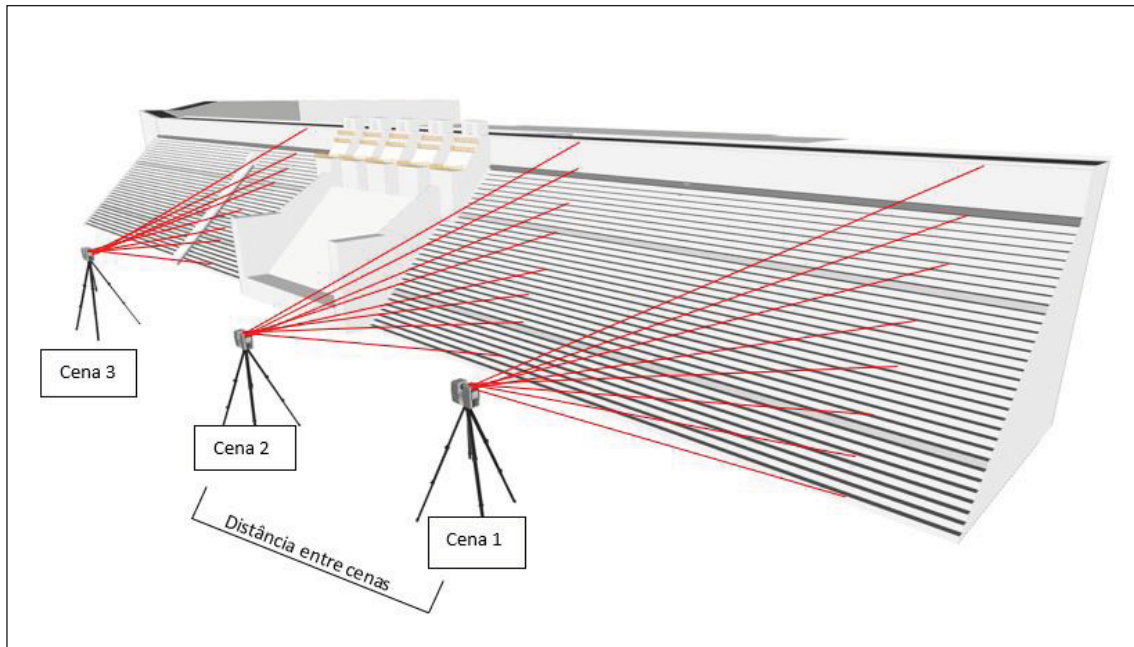
FIGURA 7 - LEVANTAMENTO DE UMA CENA



Fonte: A autora, 2018.

Os locais ideais para a tomada das cenas devem ser escolhidos para garantir a cobertura do objeto e as precisões adequadas à aplicação. Já a distância entre as cenas define a taxa de sobreposição dos dados, grandes áreas de sobreposição podem facilitar a etapa de processamento (FIGURA 8).

FIGURA 8 - POSIÇÃO E DISTÂNCIA ENTRE CENAS



Fonte: A autora, 2018.

2.3.2.3 Nuvem de pontos

A nuvem de pontos consiste nos dados tridimensionais dos pontos tomados a partir de uma única cena ou proveniente da união de várias cenas que deve recobrir todos os objetos de interesse.

A união de todas as cenas de um levantamento com LST é feita a partir de pontos em comum que devem existir entre as cenas adjacentes no levantamento, assim os pontos de tomada das cenas devem ser escolhidos tal que contemple essa condição. Esses pontos em comum podem ser objetos naturais da própria região ou pontos de apoio artificiais implantados para auxiliar na união das cenas.

2.3.2.4 Alvos

Os alvos (*targets*) são pontos em comuns entre as cenas, utilizados na etapa de processamento das mesmas. Estes podem ser naturais, algum objeto bem

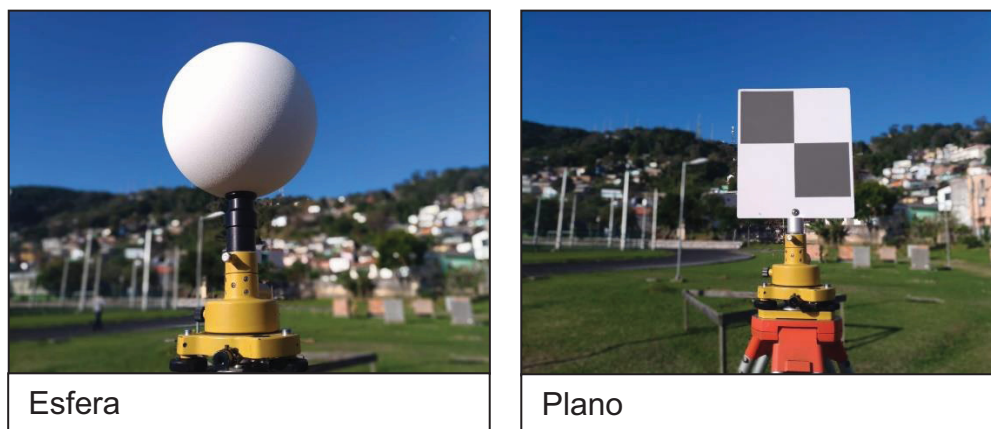
definido que já compõem o ambiente, ou artificiais, objetos inseridos no ambiente para a tomada das cenas.

Estes alvos podem ser em vários formatos, tamanhos e materiais. Os principais são o plano e a esfera.

O alvo plano trata-se de um objeto com superfície plana em que seu centro é definido através do contraste de cores detectadas pela refletância do laser, geralmente em preto e branco, são também chamados de tabuleiro (FIGURA 9). O alvo deve ser visto a partir das cenas adjacentes, instalado sobre uma base nivelante ou um bastão, ele precisa ser posicionado manualmente em direção ao ponto de varredura.

A esfera deve estar completamente visível na cena, a partir dos pontos medidos sobre sua superfície seu centro é calculado com grande precisão. O diâmetro da esfera pode variar de acordo com a aplicação e necessidade de posicioná-las distantes do equipamento, as mais comuns têm seu diâmetro variando entre 145 a 300 mm (FIGURA 9). Uma vantagem de sua utilização é o fato de poder ser levantada de qualquer posição, incluindo direções totalmente opostas.

FIGURA 9 - ALVOS UTILIZADOS NO LEVANTAMENTO COM LST



Fonte: A autora, 2018.

2.3.2.5 Fontes de erro do LST

As fontes de erros de um levantamento com LST variam de instrumento para instrumento. Reshetyuk (2006) aponta como exemplo a acurácia, precisão, resolução, variação de designs dos instrumentos, operação em diferentes

comprimentos de onda, utilização de deflectores de pulsos (espelhos ou prismas) distintos e diferentes metodologias de levantamento.

Gordon, Lichti e Stewart (2001), Staiger (2005) e Reshetyuk (2006) classificam os possíveis erros no LST em quatro tipos:

- 1) Instrumentais;
- 2) Relacionados ao objeto;
- 3) Ambientais; e
- 4) Metodológicos

2.3.3 Processamento de dados

A etapa de processamento dos dados de um LST é realizada em softwares específicos para trabalhar com nuvens de pontos como o Cyclone, Scene, Geomagic-studio, entre outros.

A nuvem de pontos é importada do equipamento em um formato nativo do fabricante, uma vez carregada no *software* é possível exportá-la em outros formatos como o *Drawing Exchange Format* (DXF), que pode ser utilizado em softwares CAD. Outra possibilidade são os formatos de arquivo públicos como o *Laser File Format Exchange Activities* (LAS) que foi desenvolvido em 2003 pela Sociedade Americana de Fotogrametria e Sensoriamento Remoto. Além deste, outros exemplos de formatos públicos são o E57 (pela Sociedade Americana de Testes e Materiais), PCD, ASCII e LAZ.

A primeira etapa do processamento consiste na detecção de *outliers* o que pode ser realizado manualmente, visualizando e excluindo erros aparentes nos dados ou por processos automáticos. Em seguida é realizado o registro, o processo que envolve a identificação de pontos comuns em cada nuvem de varredura sobreposta e transformá-los em um único sistema de coordenadas usando uma transformação de seis elementos e de corpo rígido (GORDON, LICHTI E STEWART, 2001).

O registro pode ser realizado utilizando alvos e identificando-os como pontos em comum com entre as cenas, outra maneira de registrar duas ou mais cenas é usando a sobreposição de nuvens de pontos. Se duas nuvens de pontos tiverem sobreposição suficiente (geralmente 30 a 40%), uma técnica chamada

processamento Iterativo de Ponto Fechado ou ICP pode ser usada para alinhar os dois conjuntos de dados (Quintero et. al., 2008).

Após o registro, diversos dados podem ser extraídos diretamente da nuvem de pontos, como modelagens tridimensionais, perfis longitudinais, plantas, cortes, entre outros.

2.3.4 Sistema Laser Scanner Terrestre

A tecnologia de escaneamento laser pode ser dividida em duas categorias: escaneamento estático e dinâmico. No sistema dinâmico, o varredor laser é instalado em plataformas móveis, carros ou veículos aéreos não tripulados, que sobrevoam a área em questão. Essa metodologia se torna mais complexa, uma vez que requer sistemas de posicionamento adicionais como um GNSS (*Global Navigation Satellite System*) e um sistema inercial, que modelem a atitude da plataforma afim de se restituir a posição exata dos pontos no terreno e a garantir a qualidade posicional dos mesmos.

O escaneamento estático compreende a utilização de um sistema laser *scanner* mantido em uma posição fixa. As vantagens dessa metodologia são sua alta precisão e densidade de pontos adquiridos (LENARTOVICZ, 2013). Nesta pesquisa dedica-se a tecnologia de escaneamento estática com o emprego de um sistema laser *scanner* terrestre.

As plataformas de laser *scanner* terrestre estático são um sistema usado para a determinação de coordenadas tridimensionais de pontos de uma superfície coletados com o instrumento estacionado na região de estudo em uma localização tal que seja possível visualizar a superfície de interesse. Trata-se de um sensor ativo que utiliza medição remota, ou seja, o feixe luminoso é emitido pelo equipamento e viaja através da atmosfera e interage com o objeto alvo, os átomos e moléculas constituintes do alvo refletem parte da radiação eletromagnética e seu retro espalhamento dá origem à detecção remota do laser (PAVI; BORDIN; VERONEZ, 2014).

Estas plataformas de LST possuem como principais vantagens a velocidade de coleta de dados e o alto nível de detalhamento dos objetos e feições do terreno. A vasta quantidade de dados capturados com o LST o diferencia dos demais métodos de levantamentos, e o torna aplicável a múltiplos projetos. Há, portanto, um

grau de abstração da realidade consideravelmente menor se o comparamos a métodos tradicionais, como por exemplo irradiação utilizando uma estação total, ou seja, o LST fornece um clone da realidade com redundância na descrição discreta dos objetos. Permite o uso imediato da informação 3D gerando uma nuvem de pontos onde é possível visualizar e gerenciar os pontos coletados; modelar desde uma simples planta topográfica 2D até ambientes inteiros 3D. Após o término da varredura o operador tem à sua disposição milhões de pontos com coordenadas conhecidas, estando apto a fornecer respostas sobre os objetos, como distâncias entre peças, dimensões, volumes, verticalidade de superfícies (TOMMASELLI, 2003).

2.3.4.1 Composição

Lenartovicz (2013) apresenta duas abordagens com respeito a composição de um sistema laser *scanner*. A primeira a proposta por Werh e Lohr (1999), onde trata o sistema como sendo composto por três unidades, a saber, uma unidade de medição laser, um *scanner* óptico e uma unidade de controle e processamento. A segunda é apresentada a seguir:

Outra abordagem sobre a composição do sistema laser *scanner*, são os seguintes componentes essenciais: gerador de pulsos; conjunto óptico de transmissão e recepção do pulso, e detector de sinais.

Componente principal do sensor laser, o gerador de pulso é responsável pela emissão do pulso, que ocorre devido a um estímulo realizado por um cristal sintético excitado por um diodo semiconductor. A maior parte dos sistemas laser funciona entre 0.8 a 1.6 μm do espectro eletromagnético, que possui propriedades físicas como pulsos curtos, espectro ótico estreito e alto poder de energia. Após a geração, o pulso é orientado através de tubos de flash para um espelho de varredura (deflector de pulsos). Juntamente com um conjunto de lentes, os espelhos orientam os pulsos em direção ao ambiente. Este conjunto óptico também é responsável pelo recebimento do sinal de retorno, vindo da reflexão dos objetos, e pelo seu direcionamento para o receptor. Este recebe um sinal analógico como retorno do ambiente e o converte para digital. O sinal digital passa então por um filtro de suavização, onde ocorre a verificação de sua intensidade. Assim é comparada a intensidade do sinal emitido (DALMOLIN; SANTOS, 2004).

2.3.4.2 Classificação

Alguns dos fatores que influenciam diretamente na qualidade dos dados adquiridos com esses instrumentos, são: a frequência de medição de pontos (em Hertz), alcance de medição, resolução angular, precisão linear, precisão posicional, ruído, campo de visão, ângulo máximo do compensador, se o equipamento é integrado a outros instrumentos (câmera, bateria, tipo de armazenamento), classe do laser, etc.

A principal classificação para os sistemas laser *scanner* diferencia os instrumentos segundo o método de coleta de dados utilizado para medir distâncias, que são: tempo de voo, diferença de fase e triangulação. Esta classificação não leva em consideração a técnica de escaneamento angular que é relevante na avaliação da cobertura dos objetos de interesse (LENARTOVICZ, 2013).

Staiger (2003) apresenta ainda a classificação que distingue os instrumentos em três classes a partir dos seus ângulos de cobertura:

- *Scanner* câmera - Os *scanners* do tipo câmera realizam as medições de distância e ângulos em uma limitada variação angular e em um específico campo de visada. O recobrimento *angular* desses equipamentos é de $40^\circ \times 40^\circ$.
- *Scanner* híbrido - No tipo de *scanners* híbridos o movimento de escaneamento em torno de um dos eixos de rotação é livre, enquanto o movimento em torno do outro eixo (horizontal) é limitado, podendo variar de 50° a 60° .
- *Scanner* panorâmico - O escaneamento realizado pelos *scanners* panorâmicos é realizado em um padrão sistemático que permite um recobrimento angular de 360° sobre o plano horizontal que passa pelo centro do instrumento, e um recobrimento de no mínimo 180° sobre o plano vertical, perpendicular ao plano horizontal.

No quadro 1 tem-se alguns exemplos de LST estáticos baseados nos seus princípios de medição e outras características julgadas relevantes.

QUADRO 1 - EXEMPLOS DE LASER SCANNERS TERRESTRES

Fabricante	Faro	Leica Geosystems	Trimble	Zoller+Fröhlich
Sistema	Focus 3D	HDS 7000	FX	Z+F IMAGER 5010
Comprimento de onda	905 nm	1.500 nm	685 nm	1.500 nm
Taxa de medição máxima	976.000 pontos/segundo	1.016.000 pontos/segundo	216.000 pontos/segundo	1.016.000 pontos/segundo
Campo de visão máximo (horizontal/vertical)	360°/305°	360°/320°	360°/270°	360°/320°
Alcance Máximo	120 m	187 m	80 m	187 m
Acurácia Linear	2 mm até 25 m	≤ 1 mm até 50 m	2,4 mm até 50 m	≤ 1 mm até 50 m
Acurácia Angular (horizontal/vertical)	0,009°/0,009°	0,007°/0,007°	0,008°/0,008°	0,007°/0,007°
Câmara digital	Integrada de 70 Megapixels	Não possui, mas suporta o uso de câmara externa	Não possui	Não possui, mas suporta o uso de câmara externa
Fonte	FARO	LEICA GEOSYSTEMS (b)	TRIMBLE (a)	ZOLLER+FRÖHLICH

FONTE: Andrade, 2012.

2.4 ESTADO DA ARTE

Gordon, Lichti e Stewart (2001) avaliou a digitalização a laser como um instrumento aplicável ao campo de monitoramento de deformação. Para isso inicialmente trouxe uma visão sobre o desempenho espacial do LST Cyrax Scanner com um experimento de calibração, e então realizou campanhas simulando em um ambiente controlado a deformação na estrutura.

O movimento foi introduzido em incrementos de 8,5 mm (isto é, $\Delta Y1 = -8,5$ mm, $\Delta Y2 = -17$ mm, $\Delta Y3 = -25,5$ mm). Onde o movimento vertical detectado foi de -10,9 mm, -21,2 mm e -29,6mm, para cada época, respectivamente.

A análise das nuvens de varredura resultantes mostrou que os deslocamentos detectados estavam na mesma ordem dos movimentos induzidos verticalmente. Horizontalmente houve um erro sistemático evidente possivelmente devido a dificuldades encontradas na movimentação do instrumento.

Tucker (2002) testou o LST Cyrax 2500, fabricado pela Leica, a fim de verificar sua precisão. Foram realizados dois testes, no primeiro, através de uma aplicação de alcance próximo (3 a 6 metros) onde foi verificada a precisão nas extremidades de deflexão do espelho e no segundo foram comparadas medições de distância entre os dados do LST e medidas de controle a partir de dados coletados em longo alcance (entre 40 e 50 metros, dentro das especificações).

Os pontos de controle tiveram suas coordenadas determinadas com a estação total Leica TCR-305, estes foram usadas para comparações nos dois experimentos, chegando a conclusão no primeiro teste de que o desempenho encontrado foi melhor que as especificações, tendo obtido diferenças máximas de $\pm 1,1$ mm e com especificações de ± 6 mm.

No segundo teste as incertezas chegaram a ordem de ± 4 mm, onde as especificações são também de ± 4 mm. Concluiu-se, portanto que os dados de medição estavam em consonância com as especificações de desempenho.

Shen et al. (2017) propôs um método de detecção de alterações posicionais no objeto medido com LST. Para analisar as alterações, foram utilizadas linhas de base que conectam pontos correspondentes em duas varreduras.

O teste realizado consistiu em duas varreduras com LST C10 Scan Station que amostram um prédio de alvenaria antes e depois de testes sísmicos, que resultaram em danos na ordem de vários centímetros. Os centros dos tijolos do prédio do laboratório foram automaticamente extraídos para servir como pontos virtuais. Linhas de base conectando pontos virtuais foram extraídas e comparadas em relação a um sistema de coordenadas estruturais adequado.

Por estar em ambiente controlado, a maior diferença encontrada entre a detecção de variação no objeto pelo LST comparada a métodos tradicionais foi de 0,010 m e, portanto, concluída a viabilidade do método proposto. Com ressalva a respeito da utilização de alvos estáveis disponíveis para obter um bom registro.

Luo et al. (2017) analisou as mudanças de superfície no declive com base em comparações de dados de nuvens de pontos multi-temporais para determinar como o processo hidrológico-térmico afetou a deformação da camada ativa durante os ciclos de congelamento-descongelamento, quantificando de forma abrangente a deformação da superfície.

O LST utilizado para geração da nuvem de pontos foi o 3D FARO Focus ^{3D} X130. Aproximadamente 26 varreduras foram feitas para recobrimento

da região de interesse, com mais de 1,1 milhão de pontos. O scanner LST e seis sistemas Trimble 5700 GNSS foram implantados na área de campo, o local foi monitorado quatro vezes com dois períodos de descongelamento e um período de congelamento usando um conjunto de esferas de referência de *scanner* FARO (seis esferas de referência) e um conjunto de alvos de calibração retangulares brancos e pretos em posições visíveis a área de estudo.

O SCENE 5.0 e o Studio 12 da Geomagic foram adotados para o processamento desses dados do *scanner*. Os procedimentos de processamento e análise foram divididos em quatro estágios: coleta de dados, registro, processamento de dados e análise comparativa. As mudanças proporcionais no terreno entre -0,15 m e 0 m nos dois estágios de degelo, com intervalo de 0,05 m, encontradas foram de 6% e 12%, 28% e 36% e 62% e 53%.

A tecnologia de LST pode ajudar a entender o comportamento das inclinações das deformações, bem como melhorar a capacidade de mapear a frequência espacial e o volume de falhas discretas. No entanto, mais observações de com o LST e monitoramento hidrológico-térmico serão necessários para confirmar a relação entre a deformação da superfície e os ciclos de congelamento e descongelamento.

Benito-Calvo et al. (2018) aplicou um LST em uma comparação de nuvens de pontos no monitoramento 4D de sumidouros ativos.

Utilizado o Faro Focus X330 no levantamento dos dados, utilizadas em uma comparação simples nuvem-nuvem (C2C) e uma comparação nuvem-nuvem com modelagem local (C2CIm) foram usadas para obter a primeira imagem das alterações de superfície no Cloud Compare. Posteriormente, distâncias encontradas entre nuvens de pontos sucessivas foram calculadas usando o algoritmo M3C2, desenvolvido na pesquisa. Foram detectados deslocamentos de até -1 cm em pontos, com um padrão disperso.

A deformação da fachada da casa aumentou progressivamente de outubro de 2014 a abril de 2016. Na última comparação (outubro de 2015 a abril de 2016), mais da metade da fachada foi afetada por movimentos que variaram de -0,6 a -5 cm.

Concluiu com este trabalho que uma das principais vantagens do LST em relação a outros métodos é a capacidade de mapear as zonas marginais que dão grande indicativo da situação de campo. No entanto é aconselhável aplicá-lo para

monitoramento de sumidouros com outras técnicas geodésicas complementares, como o nivelamento de alta precisão.

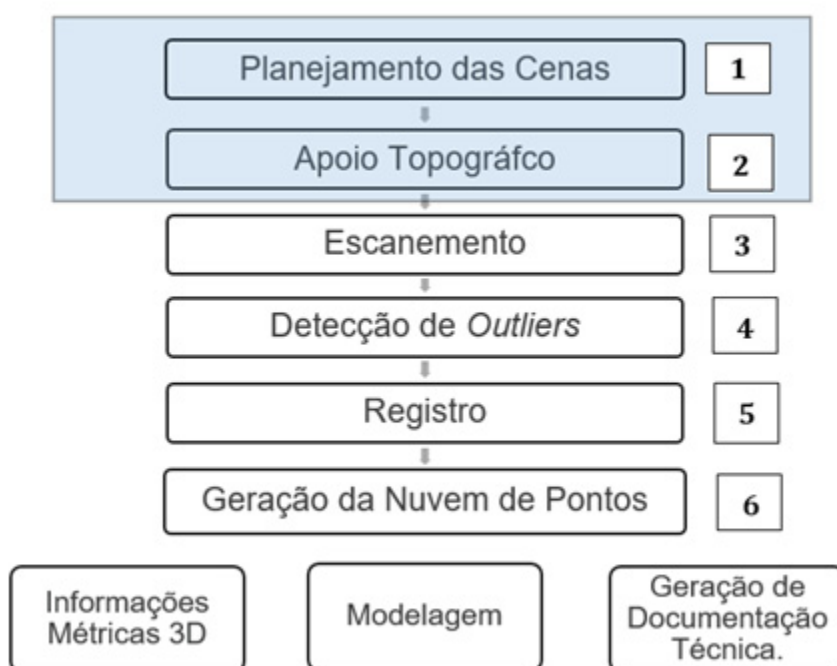
3 MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo abordará os métodos utilizados na pesquisa para o projeto da rede de monitoramento com LST para a UHE Mauá. Serão descritos os processos de reconhecimento da área, o estabelecimento de critérios para propostas de configuração da rede e o planejamento de possíveis geometrias para as mesmas, bem como simulações matemáticas a fim de buscar uma estimativa da configuração ótima.

3.1 PLANEJAMENTO (PRÉ-ANÁLISE)

Em geral as etapas de trabalho para um levantamento utilizando um LST seguem a sequência apresentada no fluxograma a seguir.

FIGURA 10 - ETAPAS DE LEVANTAMENTO COM LST



FONTE: A autora, 2018.

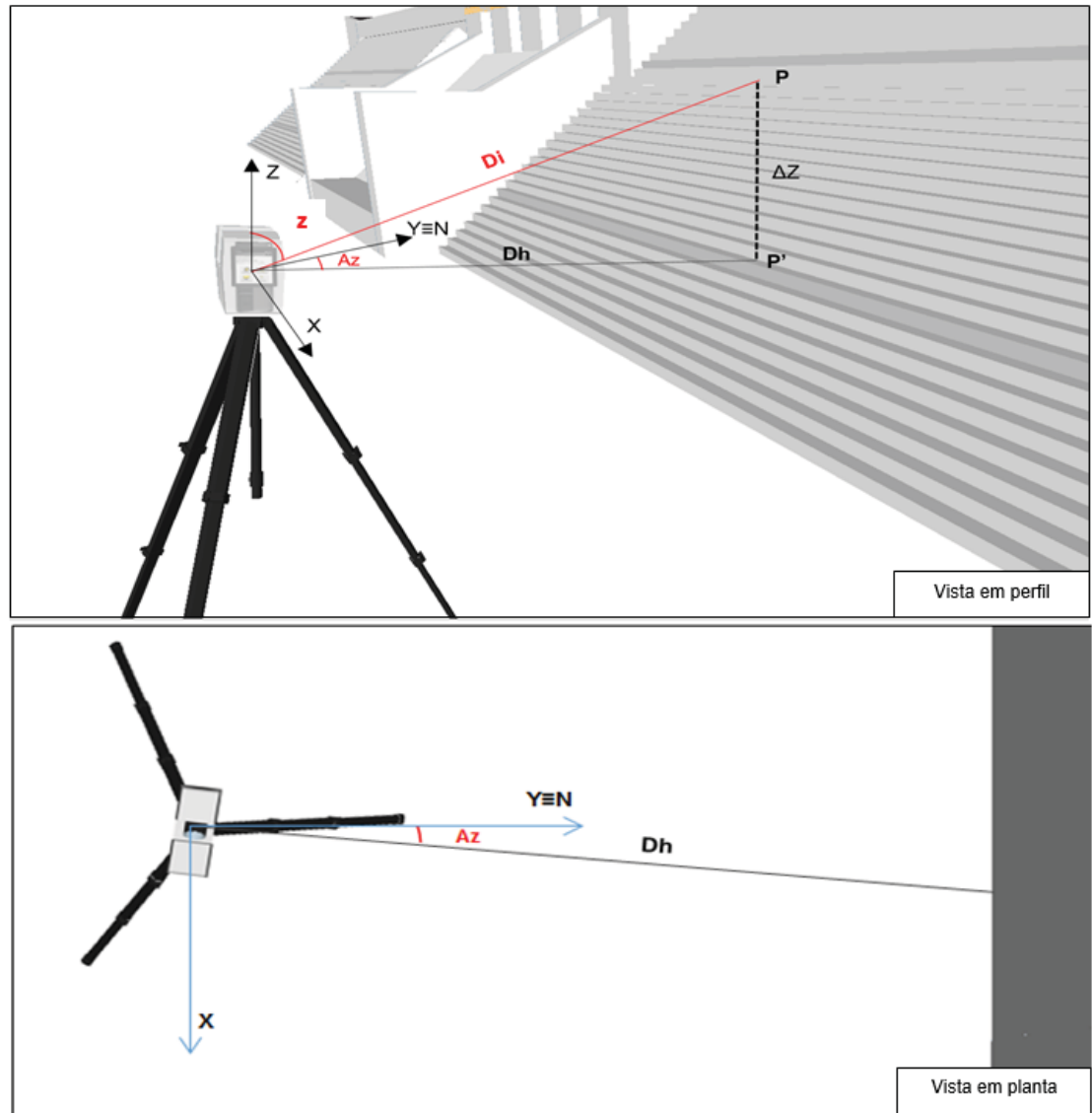
Esta pesquisa se dedica aos passos 1 e 2, já que pretende projetar uma rede de monitoramento, baseada na aplicação do LST. Para tanto se faz necessário entender como se dá matematicamente o processo de coleta de dados. Como visto

no capítulo anterior, apesar de o LST armazenar coordenadas tridimensionais como dados brutos, estas são calculadas em tempo real a partir de ângulos verticais, direções horizontais e distâncias inclinadas realizadas pelo equipamento, o que permite que se estabeleça um modelo matemático para relacionar as medidas às coordenadas tridimensionais de cada ponto escaneado. Um modelo matemático segundo Gemaël (1994), é um sistema teórico ou um conceito abstrato pelo qual se descreve um fenômeno físico ou uma série de eventos. Este modelo, não irá representar fielmente o fenômeno, mas relaciona aspectos relevantes que interessam à investigação e são usados como artifícios das pesquisas científicas e tecnológicas, por que reproduzem, conceitualmente, as interligações entre as variáveis conhecidas e as desconhecidas de um fenômeno físico, de uma maneira simplificada e que permite a execução de cálculos.

3.1.1 Pré-análise aplicando o modelo matemático de uma varredura com LST

A distância, o ângulo vertical e o ângulo horizontal compõem coordenadas polares (d , α , β) que são transformadas em coordenadas cartesianas (X , Y , Z). Estas por sua vez são armazenadas no equipamento. Para o caso de o equipamento estar orientado, ou seja, o eixo Y do sistema de referência considerado, coincidir com o eixo de origem das medições angulares, as coordenadas polares podem ser chamadas de: distância inclinada (d_i), o ângulo zenital (Z) e azimutes das direções medidas (A_z) (FIGURA 11).

FIGURA 11 - RELAÇÕES TRIGONOMÉTRICAS ENTRE O AS COORDENADAS CARTESIANAS E POLARES.



FONTE: A autora, 2018.

Onde:

- D_i - distância inclinada;
- D_h - distância horizontal;
- Az - azimute da direção observada;
- Z - ângulo zenital.

Tome-se o exemplo da figura 4. Considerando um sistema de coordenadas locais em que a origem se encontra no cruzamento entre os eixos do equipamento, o eixo Y coincida com a direção do eixo de colimação (considerando a situação do pulso laser interceptar o objeto (barragem) com um ângulo de 90°), o eixo Z com a direção do eixo vertical, e o eixo X torne o sistema dextrogiro. O ângulo de abertura horizontal será o ângulo formado entre o eixo Y e a projeção da linha de colimação para cada ponto sobre o plano horizontal. Quando o eixo Y é coincidente com o norte, é possível deduzir que para os pontos a direita do LST o ângulo de abertura horizontal do LASER é coincidente com os azimutes, que crescem a medida que o ângulo de incidência entre o feixe e a barragem diminui, para os pontos a esquerda do LST os azimutes são os ângulos replementares ao ângulo de abertura horizontal. Tendo definido um sistema de referência local, a partir das relações trigonométricas é possível obter as coordenadas cartesianas tridimensionais dos pontos medidos através das equações (2), (3) e (4).

$$X_p = X_o + D_i \cdot \text{sen } H_z \cdot \text{sen } A_z \quad (2)$$

$$Y_p = Y_o + D_i \cdot \text{sen } H_z \cdot \cos A_z \quad (3)$$

$$Z_p = Z_o + D_i \cdot \cos H_z \quad (4)$$

Onde:

X_p, Y_p, Z_p — coordenadas cartesianas do ponto P;

X_o, Y_o, Z_o — coordenadas do ponto de instalação do instrumento;

D_i — distância inclinada;

A_z — azimuth;

H_z — ângulo zenital.

Conhecendo o modelo matemático em que se relacionam as grandezas medidas para se obter as coordenadas dos pontos, é factível afirmar que existe uma relação matemática que fornece uma primeira estimativa das precisões das medidas. Viabilizando a observação da propagação de erros esperada ao longo da nuvem de pontos.

Através da lei de propagação de erros é possível definir as incertezas das variáveis que estão relacionadas ao problema e conhecer a melhor estimativa para o conjunto de dados. Combinando matematicamente as incertezas e variâncias e covariâncias das estimativas de entrada (observações e dados iniciais) é possível calcular uma incerteza padrão combinada da quantidade de saída (coordenadas determinadas).

Considerando o caso de uma única variável $f(x)$, admitindo que a grandeza x está afetada de um erro Δx , o correspondente erro em f , Δf é dado pela equação (5) (GEMAEL, 1994; AMORIM, 2006).

$$\lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{\Delta f}{\Delta x} = \frac{df}{dx} \quad (5)$$

Com o erro ΔX como sendo os desvios padrões das medidas (variáveis) σx , pode-se escrever, para o caso de várias variáveis que apresentam desvios σx_i (com i variando com o número de observações), que o desvio padrão em f pode ser estimado pela equação (6).

$$\Delta f \approx \frac{df}{dx} \Delta x \quad (6)$$

A equação (7) considera uma problemática em que as variáveis de entrada possuem incertezas, no entanto não estão correlacionadas entre si.

$$\sigma_f = \sqrt{\left(\frac{df}{dx_1}\right)^2 \cdot \sigma x_1^2 + \left(\frac{df}{dx_2}\right)^2 \cdot \sigma x_2^2 + \dots + \left(\frac{df}{dx_i}\right)^2 \cdot \sigma x_i^2} \quad (7)$$

Ao considerar as possíveis correlações entre as variáveis, a lei de propagação pode ser escrita como mostra a equação (8) e matricialmente como mostra a equação (9).

$$\sigma_f = \sqrt{\left(\frac{df}{dx_1}\right)^2 \cdot \sigma x_1^2 + \left(\frac{df}{dx_2}\right)^2 \cdot \sigma x_2^2 + 2 \cdot \sigma x_1 x_2 \cdot \left(\frac{df}{dx_1}\right) \cdot \left(\frac{df}{dx_2}\right)} \quad (8)$$

$$\sum Y = D \cdot \sum X D^T \quad (9)$$

$$\sum X = \begin{bmatrix} \sigma_{Di1}^2 & \sigma_{Di1,HZ1} & \sigma_{Di1,Az1} & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 \\ \sigma_{Hz1,Di1} & \sigma_{Hz1}^2 & \sigma_{Hz1,Az1} & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 \\ \sigma_{Az1,Di1} & \sigma_{Az1,HZ1} & \sigma_{Az1}^2 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \sigma_{Di2}^2 & \sigma_{Di2,HZ2} & \sigma_{Di2,Az2} & \dots & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \sigma_{Hz2,Di2} & \sigma_{Hz2}^2 & \sigma_{Hz2,Az2} & \dots & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \sigma_{Az2,Di2} & \sigma_{Az2,HZ2} & \sigma_{Az2}^2 & \dots & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & \sigma_{Di n}^2 & \sigma_{Di,HZ n} & \sigma_{Di,Az n} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & \sigma_{Hz,Di n} & \sigma_{Hz}^2 n & \sigma_{Hz,Az n} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & \sigma_{Az,Di n} & \sigma_{Az,HZ n} & \sigma_{Az}^2 n \end{bmatrix} \quad (10)$$

Onde D é a matriz jacobiana formada pelas derivadas parciais do modelo matemático e $\sum Y$ e $\sum X$ são as matrizes variância-covariância.

A seguir pode-se observar essas matrizes adaptadas para o modelo matemático descrito pelas equações (2), (3) e (4).

$$D = \frac{\partial f}{\partial x} \Big|_{x=x_0} = \begin{bmatrix} \frac{\partial Xp1}{\partial Di} & \frac{\partial Xp1}{\partial HZ} & \frac{\partial Xp1}{\partial Az} \\ \frac{\partial Yp1}{\partial Di} & \frac{\partial Yp1}{\partial HZ} & \frac{\partial Yp1}{\partial Az} \\ \frac{\partial Zp1}{\partial Di} & \frac{\partial Zp1}{\partial HZ} & \frac{\partial Zp1}{\partial Az} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial Xp n}{\partial Di} & \frac{\partial Xpi}{\partial HZ} & \frac{\partial Xp n}{\partial Az} \\ \frac{\partial Yp n}{\partial Di} & \frac{\partial Yp n}{\partial HZ} & \frac{\partial Yp n}{\partial Az} \\ \frac{\partial Zp n}{\partial Di} & \frac{\partial Zp n}{\partial HZ} & \frac{\partial Zp n}{\partial Az} \end{bmatrix} \quad (11)$$

Cada um dos pontos medidos possui uma matriz 3x3 relativa às variâncias e covariâncias de suas coordenadas (X, Y, Z), a MVC (matriz variância covariância) completa das observações será uma matriz de dimensões n x n, onde n é igual a 3 vezes o número de pontos medidos. Na equação (11) as covariâncias entre as equações de diferentes pontos foram consideradas nulas.

Ao aplicar a equação (9) para os pontos objeto a serem medidos com o LST é possível obter uma estimativa de como as varrições angulares e lineares influenciam as precisões dos pontos ao longo de cada cena, embora haja características específicas das propriedades de um LST que também influenciem nesta relação, das quais uma das principais que afeta fortemente a resolução da nuvem de pontos e a incerteza posicional é a largura do feixe de laser.

A implicação prática de uma largura de feixe laser variável é uma incerteza inerente na localização angular do ponto no qual a medição é feita que pode estar em qualquer lugar dentro da área projetada do feixe.

Assim, pode-se observar uma relação direta e proporcional entre a incerteza da mediação e o raio do feixe (w), uma vez que este é modelado pode ser usado como uma variável de incerteza na estimativa de qualidade das medições para cada ponto simulado.

Na equação (12), w_0 é o raio mínimo do feixe e ρ_w é o intervalo em relação ao local de saída o feixe e o objeto (LICHTI, D. e S.J. GORDON, 2004).

$$w(\rho_w) = w_0 \sqrt{1 + \left(\frac{\lambda \rho_w}{\pi w_0^2} \right)^2} \quad (12)$$

Todas essas estimativas são possíveis se forem simuladas as observações (D_i , H_z , A_z) para cada ponto, ou uma amostra desses pontos, o que é exequível a partir do conhecimento prévio da área e escolha dos possíveis pontos da rede onde será instalado o equipamento.

Algumas informações relevantes sobre a UHE Mauá foram obtidas através de visitas técnicas realizadas em projetos anteriores na região e da bibliografia disponível tratadas no próximo item.

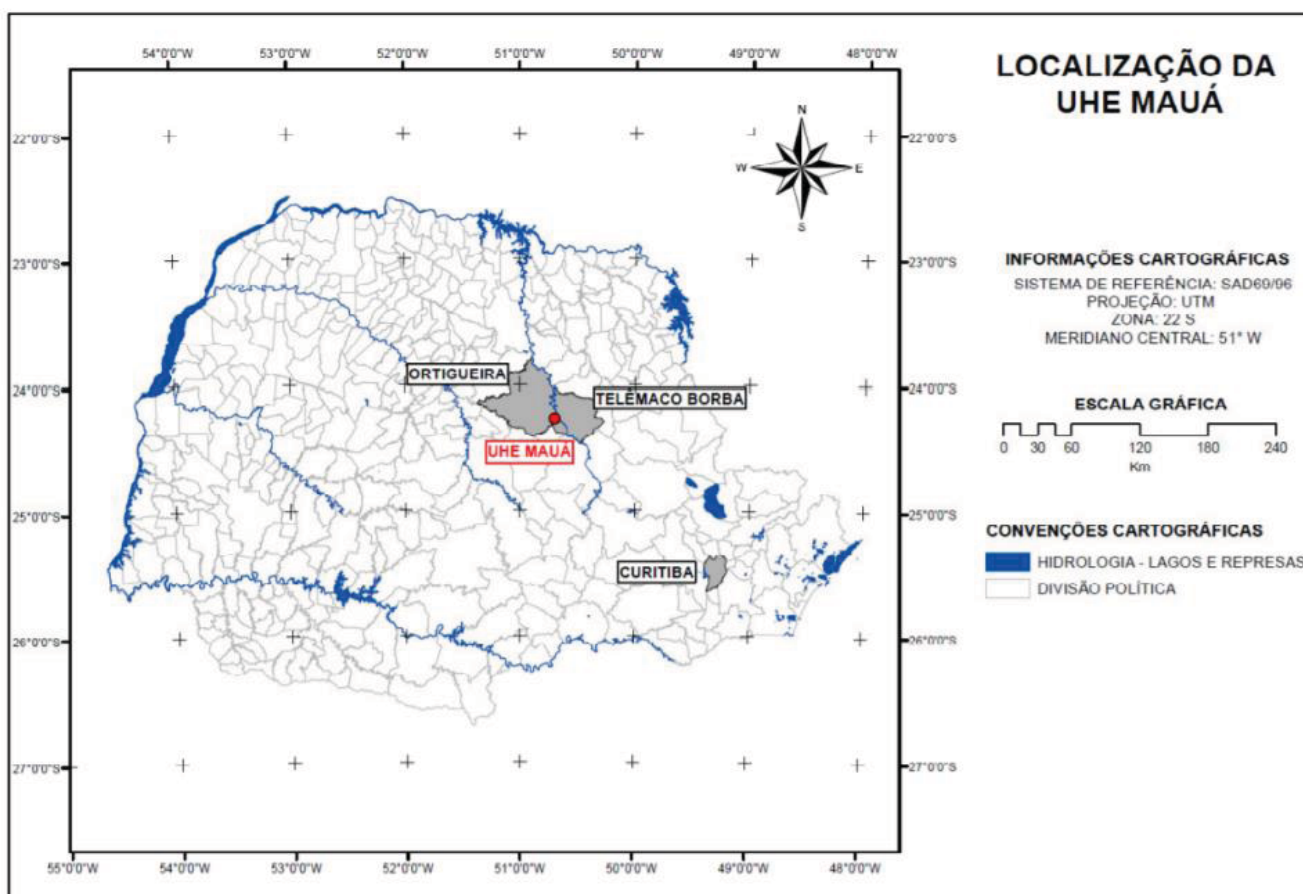
3.2 UHE MAUÁ

A Usina Hidrelétrica de Mauá está situada entre os municípios de Ortigueira e Telêmaco Borba, nos Campos Gerais do estado do Paraná, mais especificamente, no Salto Mauá, considerado a porção média do rio Tibagi (FIGURA 12).

A UHE Mauá é composta de uma barragem de CCR (Concreto Compactado à Rolo) de aproximadamente 85 m de altura máxima, 745 m de comprimento de crista, com reservatório que atinge, no nível máximo normal, uma área de 83,9 km² e gera cerca de 361 MW de potência instalada e mais 11 MW gerados pela usina complementar, o que significa a capacidade de atender ao consumo de um milhão de pessoas (CONSÓRCIO ENERGÉTICO CRUZEIRO DO SUL, 2013).

A UHE de Mauá pode ser considerada a sexta maior usina em operação no estado do Paraná desde 2012, controlada pelo Consórcio Cruzeiro do Sul, composto pela Companhia Paranaense de Energia (COPEL) e pela Eletrosul Centrais Elétricas S.A. (SILVA, 2015).

FIGURA 12 - MAPA DA LOCALIZAÇÃO DA UHE MAUÁ

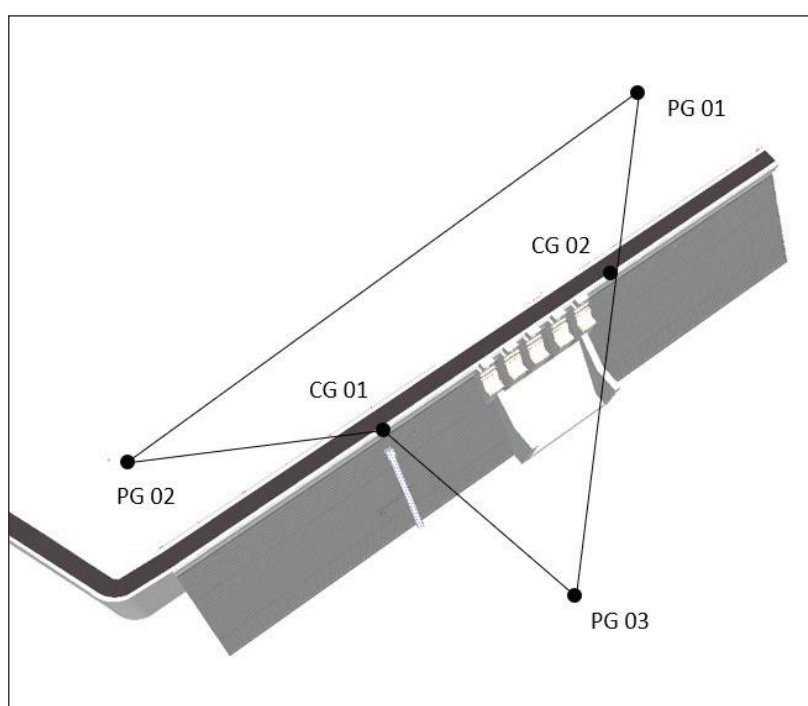


FONTE: Silva, 2012.

3.2.1 Rede de monitoramento na UHE Mauá

Foi implantada na UHE Mauá uma rede de monitoramento geodésica absoluta com alguns pontos materializados por meio de pilares de concreto, dotados de um sistema de centragem forçada e construídos engastados em rocha. Esta é composta por dois pilares geodésicos a montante (PG01 e PG02), dois pontos localizados na crista da barragem (CG01 e CG02) e um pilar a jusante (PG03) (FIGURA 13) (NADAL et al. 2015).

FIGURA 13 - POSIÇÕES APROXIMADAS DOS PILARES QUE FORMAM A REDE GEODÉSICA DE MONITORAMENTO DA UHE MAUÁ.



FONTE: Adaptado de NADAL et al. 2015.

As redes de referência absoluta são aquelas em que alguns ou todos os pontos da mesma estão fora da área sujeita a deslocamentos, são consideradas estáveis, possibilitando a determinação dos deslocamentos de cada ponto individualmente.

A rede implantada na UHE de Mauá (FIGURA 13), por conter pontos implantados em pilares de centragem forçada engastados na rocha (PG 01, PG 02 e PG 03), nas regiões adjacentes a barragem, pode ser utilizada como controle para demais pontos que precisem ser fixados na região da barragem, o que favorece a implantação de uma rede de monitoramento para a utilização do LST. Considerando as limitações no alcance desses instrumentos uma rede que possibilite sua

utilização se classificaria como relativa, quando todos os pontos da rede estão localizados na área sujeita a deslocamentos. No entanto, ainda que os pontos da rede estejam dentro da região suscetível a deslocamentos estes poderão ser controlados tendo como base a rede absoluta já existente.

3.2.2 Reconhecimento e identificação da área de interesse

Segundo Silva (2015) uma barragem, como parte da estrutura de uma UHE, é a barreira artificial, construída no leito do rio para a retenção de grandes quantidades de água permitindo a formação do lago artificial. Quanto maior a altura desta barragem maior será a quantidade de água represada, na UHE de Mauá o volume total do reservatório é de aproximadamente $6,3 \times 10^5 \text{ m}^3$. O intuito da retenção de água é a geração de energia potencial gravitacional. A água do reservatório representa uma quantidade de energia que poderá ser gerada através do movimento descendente da água, transformando-a em energia cinética. Este movimento de queda ocorre no interior da estrutura denominada de tomada d'água, que é responsável pela condução da água do reservatório para turbinas onde a energia mecânica é transformada em elétrica.

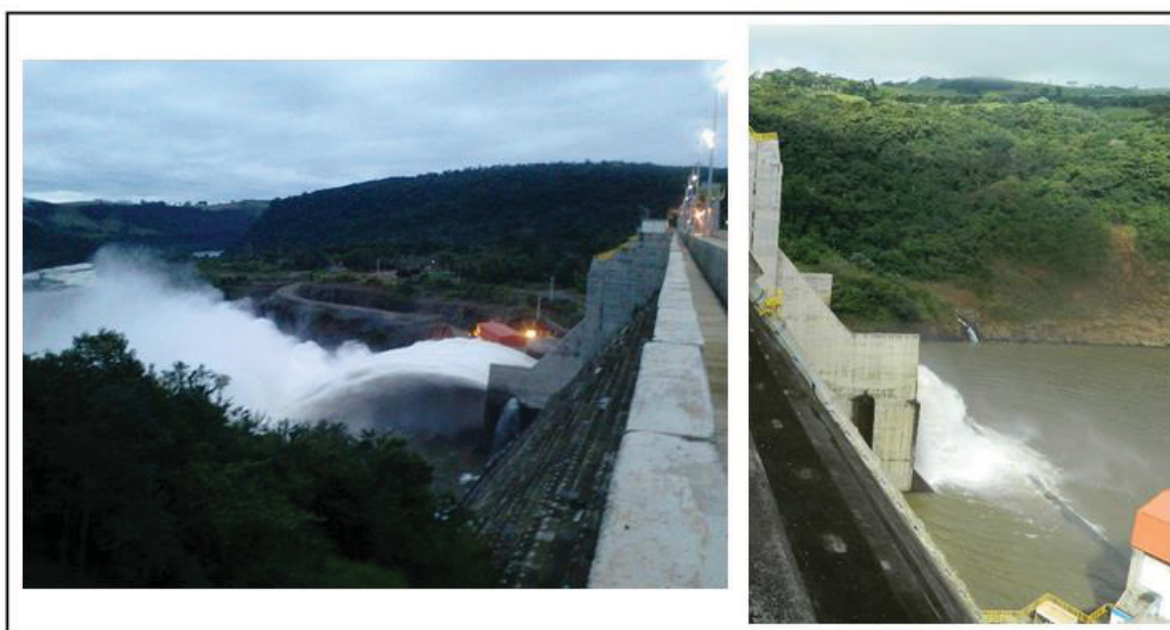
Compondo o corpo do barramento está o vertedouro que é a estrutura capaz de regular o nível da água no reservatório controlando a vazão em épocas de cheia. Para o caso da estrutura em questão o vertedouro foi construído com quatro vãos controlados por comportas tipo setor com 11,4 m (DUARTE, et al. 2010). Quando há necessidade de controle do nível da água do reservatório essas comportas são abertas, fazendo com que um grande volume de água escoe. Esse escoamento pode se tornar um obstáculo para a aproximação da estrutura a jusante pelo grande volume de água vertido (FIGURA 14).

Além da abertura das comportas, na região do entorno da barragem podem ser identificados diversos obstáculos naturais e artificiais, advindos da própria topografia da região e a existência de construções próximas a mesma. Esta realidade de campo acaba impedindo a ocupação com o instrumento em algumas regiões, o que deve ser enfatizado por se tratar de um projeto de monitoramento onde é imprescindível pensar também na garantia de reocupação desses pontos em diferentes épocas.

Isso posto, foi definido que o planejamento da rede contemplasse unicamente a região que compreende ao lado esquerdo das comportas da barragem podendo futuramente ser expandido para todo o barramento.

Consequentemente o planejamento dos pontos da rede deve iniciar do reconhecimento das regiões onde existam impossibilidades de implantação dos mesmos, considerando além das especificações do instrumento e dos resultados desejados também a topografia e possíveis percalços que impeçam a implantação e/ou futuras ocupações dos pontos

FIGURA 14 - COMPORTAS ABERTAS NA UHE MAUÁ



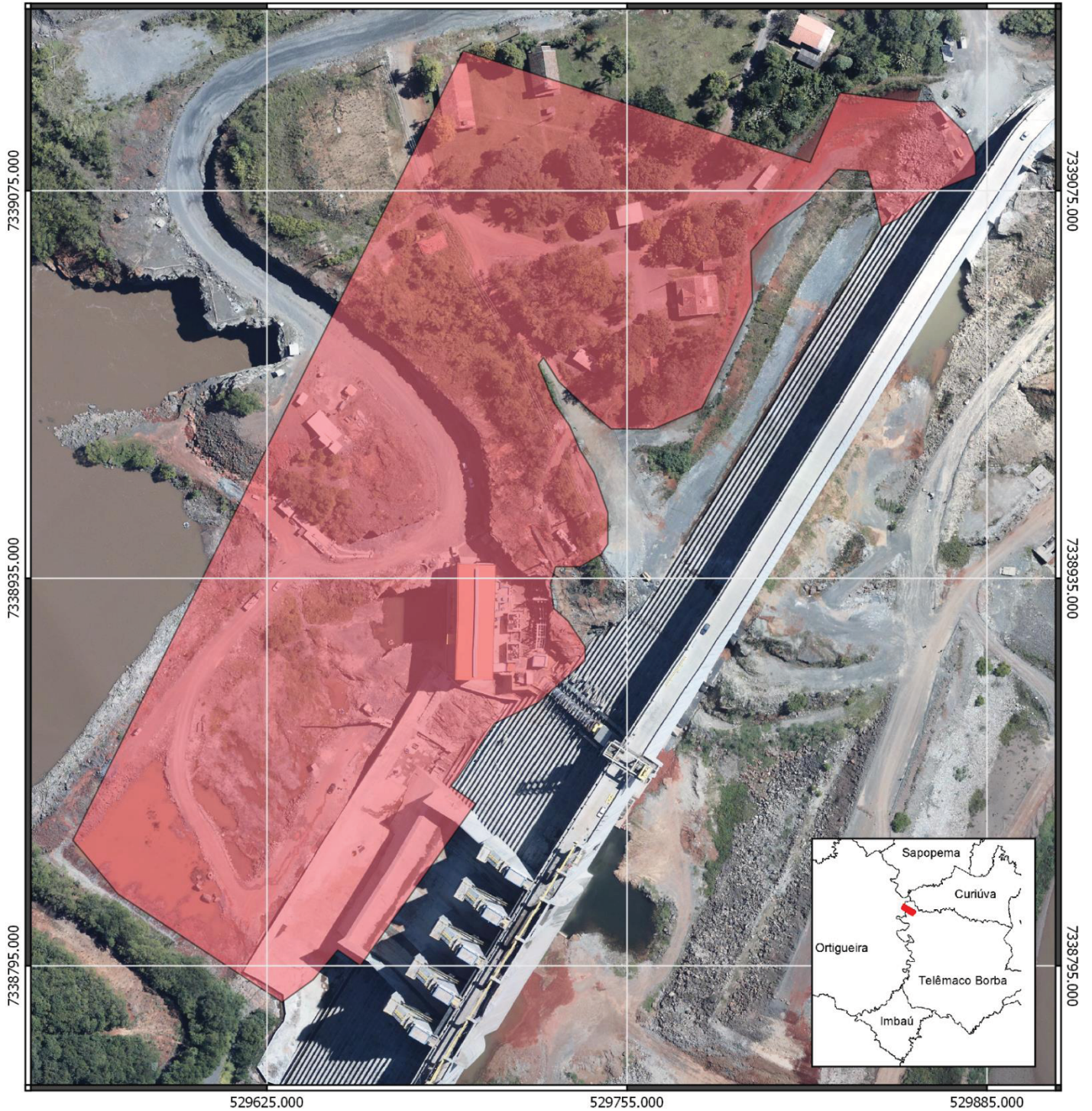
FONTE: A autora, 2017.

Para identificar as regiões onde não há possibilidade de implantação de pontos foram utilizadas ortofotocartas na escala 1:1000 geradas pela empresa Fiducial Engenharia e Aerolevante em 2012 em convênio com a UFPR e COPEL. É importante ressaltar que essas imagens foram tomadas antes da formação do reservatório e há que se considerar os obstáculos gerados pela abertura das comportas, o que inviabiliza a utilização da região a frente e a direita das mesmas.

Para destacar os locais identificados como inapropriados utilizou-se um polígono na cor vermelha sobre a ortofotocarta (FIGURA 15). Estas regiões foram definidas com base na identificação visual e nas considerações sobre a área feitas por Lenartovicz (2013). É importante ressaltar que há nesta determinação

localizações classificadas como inapropriadas que poderiam, através de adequações de obras de engenharia, ser adaptadas à ocupação, foi, no entanto, considerada a região tal qual seu estado atual. Por conseguinte, o planejamento da rede deverá considerar as áreas livres buscando representações cada vez mais adequadas da estrutura.

FIGURA 15 – ÁREAS DE RESTRIÇÃO PARA UHE MAUÁ PARA INSTALAÇÃO DE PONTOS DA REDE DE MONITORAMENTO



Legenda

Áreas de restrição

20 0 20 40 60 80 100 m



1:2000

Sistema de referência: SIRGAS 2000

Projeção: UTM

Zona: 22 S

Meridiano Central: 51°W

Cobertura aerofotogramétrica: 06/03/2012

Origem dos dados: Fiducial Engenharia/UFPR/COPEL

Edição temática: 10/02/2018

FONTE: A autora, 2018.

A próxima etapa refere-se à definição de cenários prováveis para a geometria da rede, considerando o fato de que os pontos deveram estar fora da área abrangida pelo polígono demonstrado na figura (15). No entanto, este critério não é suficiente para se garantir a aplicação do LST com o intuito proposto para o monitoramento. Devem ser, portanto, observadas também as características do equipamento e as especificidades de sua aplicação em casos onde os dados terão uma finalidade específica de comparar medições realizadas em diferentes campanhas.

No tópico seguinte são demonstrados experimentos realizados com o propósito de se estabelecer esses critérios.

3.3 DEFINIÇÃO DE CRITÉRIOS PARA PROPOSIÇÃO DA REDE

Planejar ou otimizar uma rede geodésica consiste em estabelecer sua geometria ótima. Para tal é essencial ter em mente além de sua finalidade, os critérios pré-estabelecidos de acordo com os objetivos do projeto. A rede que se pretende projetar tem a finalidade de estabelecer pontos no entorno da barragem que tornem possível o levantamento com LST, garantindo o recobrimento necessário em duas ou mais campanhas além da melhor qualidade de dados possível aplicados ao monitoramento da estrutura através desta tecnologia. Portanto, ao estabelecer critérios que permitam atingir essa finalidade é imprescindível entender como esses dados serão utilizados no monitoramento.

Em um projeto de monitoramento são realizados dois ou mais levantamentos com o LST de um mesmo objeto em épocas distintas. Estes dados são então comparados entre si a fim de detectar possíveis deslocamentos ou mesmo analisar como o objeto se comporta ao longo do tempo, entendendo as tendências de movimentação de maneira global. Outra possibilidade é comparar um dado de um levantamento com modelo já existente do mesmo objeto.

A realização do monitoramento global de objetos por meio de dados obtidos com o LST é viabilizada por meio de softwares específicos que oferecem funções que permitem essa comparação.

A análise de funcionamento dessas funções no que tange a relação entre seu desempenho e as características de coletas de dados em campo pode assegurar sua aplicação nos resultados finais do levantamento.

Existem hoje no mercado diversos *softwares* que oferecem esta função de comparar uma ou mais campanhas realizadas com este tipo de equipamento. Estes *softwares* utilizam técnicas distintas na comparação de dados. As mais comuns são a comparação de nuvens a nuvens (por pontos), e a comparação entre nuvens de pontos e figuras geométricas, como por exemplo os planos.

Um dos softwares que vem sendo amplamente aplicado no monitoramento com LST é o *CloudCompare* por ser um software livre de código aberto originalmente criado para detectar mudanças entre duas nuvens de pontos ao compará-las diretamente. Como as nuvens de pontos em sua grande maioria são dados oriundos de um LST, com o tempo este *software* foi se especificando e passou a abranger também a edição e processamento desses dados.

Para detectar variações ao se confrontar duas nuvens de pontos, o *CloudCompare* calcula a distância entre os pontos dessas nuvens. Tendo uma delas como referência a segunda é comparada, as distâncias entre elas são computadas e utilizadas como parâmetro para atribuir uma variável de cor aos pontos da nuvem com um espectro de cor variando entre valores e tons de cor, assim caso não haja diferenças detectadas toda a nuvem será pigmentada em uma única cor.

Segundo a documentação do software *Cloudcompare*, o método de comparação nuvem a nuvem (*cloud-cloud distances*), utiliza como padrão o cálculo de distâncias entre pontos pelo algoritmo do vizinho mais próximo (*nearest neighbor*). Para cada ponto da nuvem a ser comparada, o software busca o ponto mais próximo na nuvem de referência e calcula a distância euclidiana entre eles, desta forma é capaz de comparar nuvens pontos diretamente, sem a necessidade de gerar uma malha intermediária, o que viabiliza os processos em alguns casos, já que as malhas algumas vezes são complexas de se gerar com eficácia, especialmente nas cenas que representam ambientes complexos, devido a ruídos e densidade variável.

Outros *softwares* que tem o funcionamento similar ao *CloudCompare* e, portanto, também permitem a comparação entre nuvens geradas em duas ou mais campanhas de monitoramento são o *Geomagic Studio* da US Corporate Headquarters, o *Rhinoceros*, o *PolyWorks* e o *3DReshaper*.

Em todos os métodos e/ou softwares utilizados o bom desempenho de suas funções está diretamente relacionado às características dos dados coletados em campo, quanto melhores as condições de coleta, melhor a capacidade de detectar com eficácia eventuais mudanças no objeto entre as duas campanhas.

Conseguir as melhores condições de levantamento desses dados permeia uma série de características de campo, como a posição do equipamento em relação ao objeto (posição dos pontos da rede), as configurações do equipamento na coleta.

A princípio pode-se pensar que a melhor alternativa para a definição dos pontos seria o mais próximo possível do objeto e quando em campo utilizar a maior resolução disponível no equipamento. No entanto, quanto mais próximo da barragem menor o campo de recobrimento e, portanto, mais ocupações seriam necessárias, além de aumentar as oclusões devido aos degraus. Se estas forem realizadas com a maior resolução disponível no equipamento demandaria um aumento considerável no tempo de levantamento e principalmente no volume de dados, desfavorecendo a utilização da tecnologia já que haveriam dificuldades de armazenamento e manipulação dos dados trazendo a imprescindibilidade de se dispor de hardwares com grande capacidade de processamento e excelentes placas gráficas, o que acarreta também em aumento de custos.

Em função disto, alguns experimentos foram realizados com a intenção de testar as funções dos *softwares* e fazer uma análise da configuração ideal do *scanner* estabelecendo alguns critérios a serem adotados para a escolha da rede proposta, a fim de otimizar cobertura dos dados, confiabilidade, tempo de execução, praticidade e custos.

O equipamento disponibilizado para realização do projeto é o *Laser Scanner* modelo FARO FOCUS 120 da FARO, com precisões lineares e angulares de ± 4 mm e $\pm 0.009^\circ$ respectivamente.

Os testes foram realizados no Instituto Federal de Santa Catarina - Campus Florianópolis com o apoio e estruturas do curso Técnico em Agrimensura. O local escolhido no campus para realização do teste foi o Ginásio de Esportes 2, por ser no campus, a estrutura com maior medida horizontal e vertical que permitiria a ocupação com o LST de diferentes posições. Medindo 26,427 metros de comprimento e 9,5 metros de altura.

Foram realizadas algumas cenas, com diferentes distâncias do objeto e variando os parâmetros de varredura como resolução, qualidade e faixa de

varredura, que são os parâmetros usados pelo equipamento para gravar os dados. A escolha adequada desses parâmetros pode tornar o levantamento mais ou menos eficaz.

Duas cenas de mesma configuração foram feitas a partir de cada posição de varredura, foram testadas nove diferentes situações. A primeira varredura de cada situação foi considerada como a primeira época, as quais foram realizadas com o objeto original sem nenhuma interferência. Para a segunda cena foi introduzida à cena uma placa de madeira medindo 2 por 1,5 metros e 5 centímetros de espessura, simulando uma modificação no ambiente. Esta placa foi fixada rente a parede na região central da estrutura, onde o ângulo de incidência do feixe laser é 90°, dada a posição do equipamento em relação ao objeto.

O primeiro cenário testado foi com a resolução mínima de 30,680 mm de distância pontual no espaçamento horizontal e vertical quando o alcance é de 10 m, o que significa que a medida que o alcance se torna maior que 10 metros a distância pontual se torna cada vez maior.

Quanto ao campo de visão, a capacidade máxima deste equipamento é de 360 graus em relação ao eixo Z e 300 graus em amplitude vertical, indicada para obter um quadro geral de todo o campo de visão do LST, no entanto, isso gera um aumento considerável da quantidade de pontos e no tempo de escaneamento. Como o intuito foi testar a melhor configuração para o escaneamento do barramento da UHE, são também relevantes o tempo necessário em cada cena e a eficiência na manipulação dos dados no pós-processamento, por isso foi reduzido a faixa de varredura horizontal de acordo com a distância ao objeto, garantindo a cobertura necessária.

Para essa primeira situação o LST foi instalado a uma distância de 30 metros do objeto na região central do ginásio, ou seja, a distância ortogonal entre o LST e o objeto ocorreu no centro mesmo.

O campo de visão horizontal considerado foi 180 graus. Neste caso, para recobrimento total do objeto seria suficiente um ângulo de abertura de 124,14 graus.

A qualidade de coleta dos dados foi configurada para o fator de número 2. Este parâmetro tem variação entre 2 e 8, sendo 2 a mais baixa e 8 a mais alta qualidade. Esta variação permite equilibrar as necessidades de qualidade e velocidade, aumentando-a é possível reduzir o ruído nos dados da varredura e,

consequentemente, aumentar a qualidade da varredura que resultará no aumento do tempo de execução no levantamento.

Adotando estas configurações o tempo para conclusão da varredura foi de aproximadamente 4 minutos por cena.

Ainda com o equipamento a 30 metros de distância foram geradas outras duas cenas, em um segundo cenário onde a resolução proposta foi de 12,272 mm de distância pontual (em 10 m), para a qualidade houve um aumento para 4, campo de visão 180°, o que resultou em um tempo de coleta de 6 minutos por cena.

Em seguida os dois últimos escaneamentos nesta posição foram tomados considerando um terceiro cenário no qual foi alterando apenas a resolução para a mais alta disponível no equipamento de 3,068 mm de distância pontual (em 10 m) e a qualidade para 6 o que gerou um tempo de coleta de aproximadamente 01 hora e 57 minutos por cena.

Um resumo dos três cenários iniciais propostos pode ser observado no QUADRO 2.

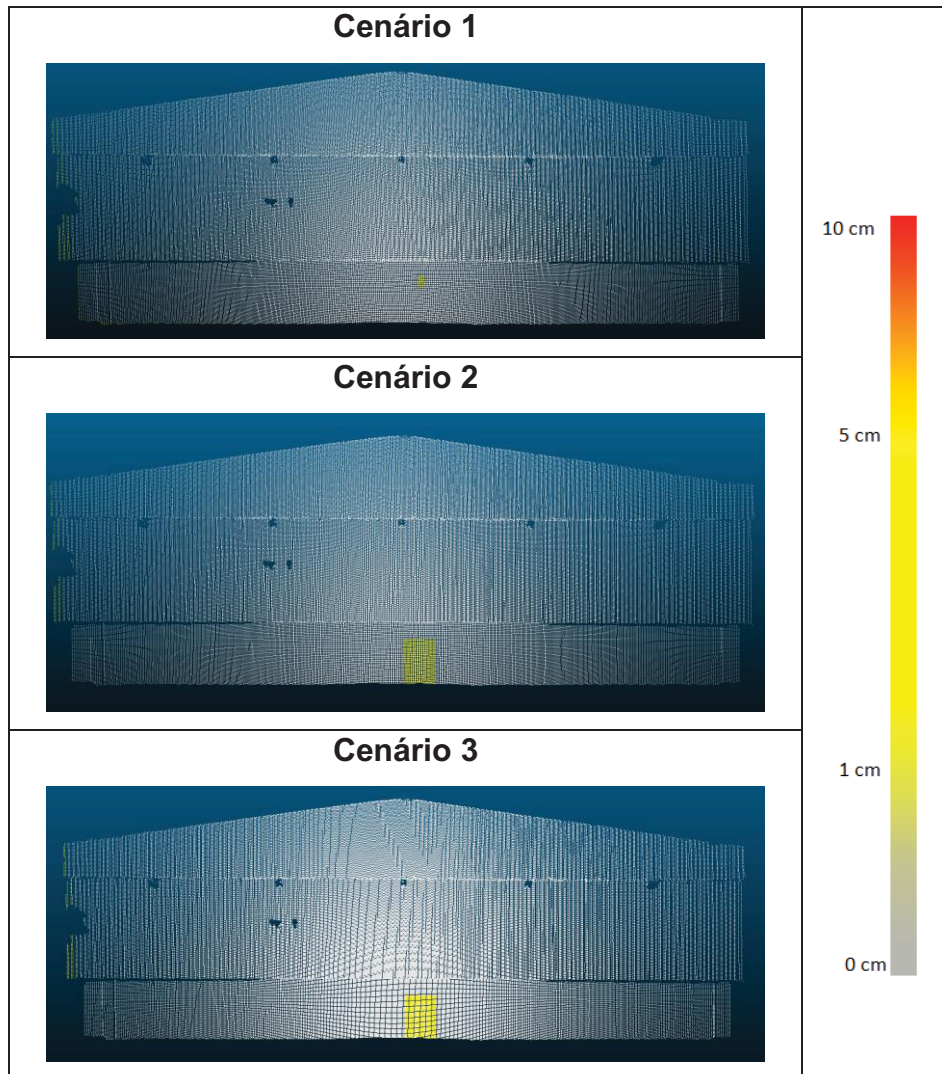
QUADRO 2 – CARACTERISTICAS DOS CENÁRIOS INICIAIS.

Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3
Distância: 30 metros Resolução: 30,680 mm de distância pontual (em 10 m) Qualidade:2 Tempo por varredura: 4 min.	Distância: 30 metros Resolução: 12,272 mm de distância pontual (em 10 m) Qualidade:4 Tempo por varredura: 6 min.	Distância: 30 metros Resolução: 3,068 mm de distância pontual (em 10 m) Qualidade: 6 Tempo por varredura: 1h 57 min.

FONTE: A autora, 2018.

Uma vez realizado o levantamento em campo o *software* utilizado no processamento foi o CloudCompare com o qual foi comparado nuvem a nuvem as consideradas primeiras e segundas épocas em cada cenário proposto (FIGURA 16), a detecção de *outliers* (entendido aqui como ruídos da nuvem de pontos) foi realizada visualmente e mostrou-se fundamental para se obter comparações coerentes em relação ao processamento sem considerar esta etapa.

FIGURA 16 - RESULTADO DA COMPARAÇÃO DE NUVENS PARA OS CENÁRIOS 1,2 E 3.



FONTE: A autora, 2018.

Dos três cenários propostos pode ser observado que a esta distância do objeto é necessário utilizar a mais alta resolução disponível no equipamento (Cenário 3), para que a placa de madeira seja detectada ao comparar-se as duas épocas, o que a carrega em um aumento considerável no tempo de execução. Na escala de cores a cor cinza indica que não houveram ou não foram detectadas nenhuma alteração no objeto e a cor vermelha representa as maiores alterações detectadas. Por se tratar de um ambiente controlado a maior eficácia esperada seria a detecção total da placa de madeira introduzida no objeto, com as distâncias entre a primeira e segunda nuvem de pontos comparadas correspondendo ao tamanho real da espessura placa.

No entanto, as maiores diferenças detectadas no cenário 3 foram de 4,5 centímetros. Para o cenário 2 foram detectadas apenas distâncias de 1,0 centímetro e no cenário 1 o objeto não foi detectado.

Em um segundo momento o equipamento foi movido para mais próximo da estrutura, para uma distância de aproximadamente 20 metros do objeto de onde foram tomadas cenas seguindo as mesmas configurações dos três cenários anteriores (QUADRO 3).

QUADRO 3 – CARACTERÍSTICAS DOS CENÁRIOS 3,4 e 5.

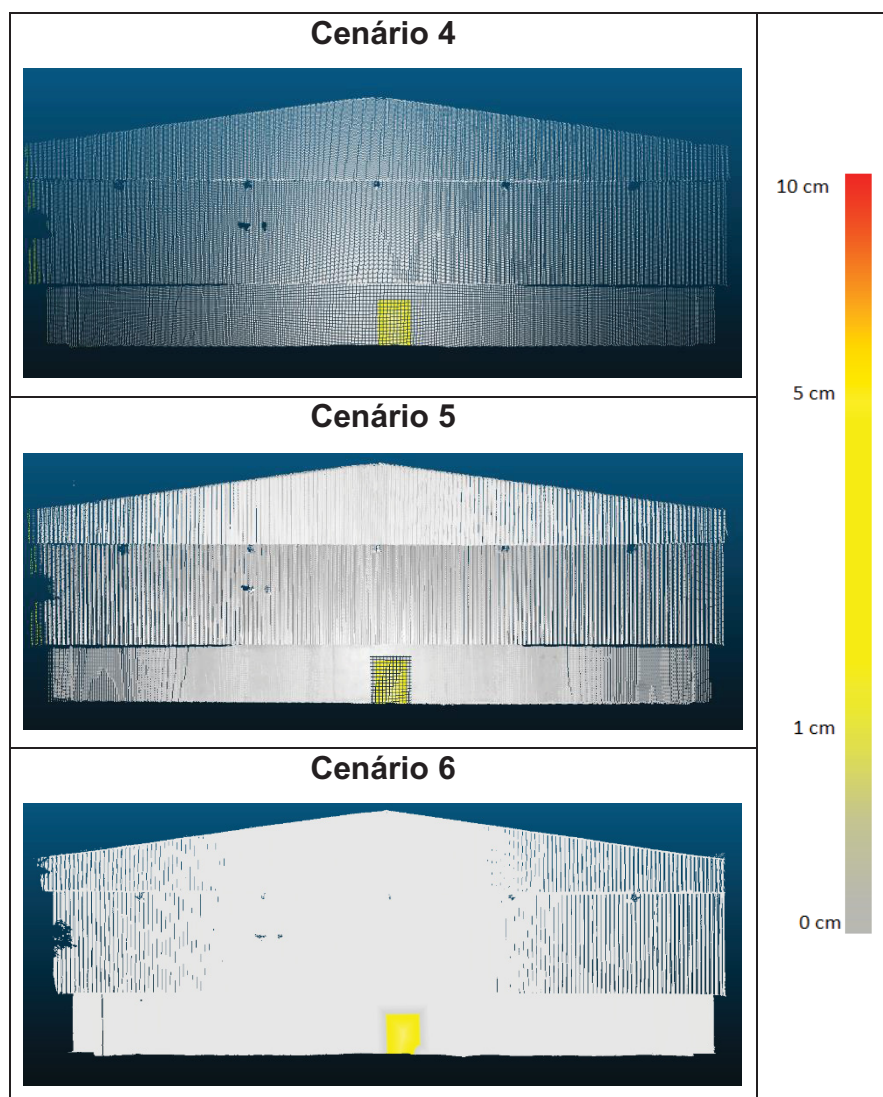
Cenário 3	Cenário 4	Cenário 5
Distância: 20 metros Resolução: 30,680 mm de distância pontual (em 10 m) Qualidade: 2 Tempo por varredura: 4 min.	Distância: 20 metros Resolução: 12,272 mm de distância pontual (em 10 m) Qualidade: 4 Tempo por varredura: 6 min.	Distância: 20 metros Resolução: 3,068 mm de distância pontual (em 10 m) Qualidade: 6 Tempo por varredura: 1h 57 min.

FONTE: A autora, 2018.

Ao comparar as nuvens de pontos destes três novos cenários pode-se observar que para essa distância o reconhecimento das mudanças introduzidas ocorreu de modo, mas eficiente, sendo diretamente proporcional a resolução e a qualidade da cena (FIGURA 17).

No cenário 4 foi detectada a distância máxima de 3,5 cm, no cenário 5 de 4,0 cm e no cenário 6 de 5,6 cm se aproximado do tamanho real da espessura da placa.

FIGURA 17 - RESULTADO DA COMPARAÇÃO DE NUVENS PARA OS CENÁRIOS 4,5 E 6.



FONTE: A autora, 2018.

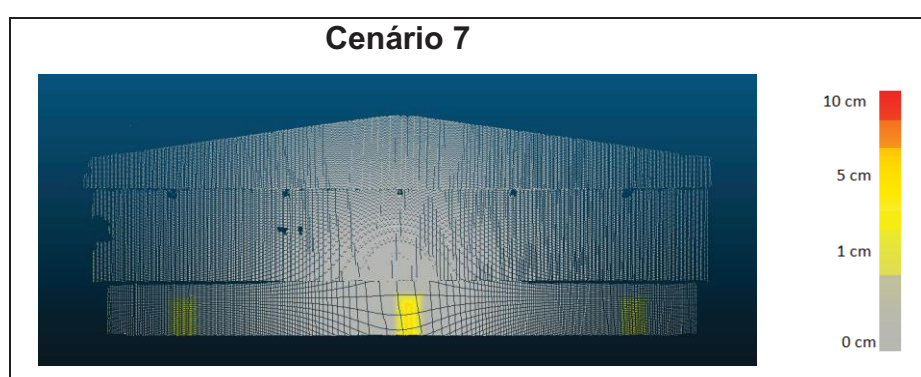
Diante dos cenários avaliados até então, pode-se verificar que os cenários 5 e 6 detectaram as medidas mais adequadas a realidade. Com tudo no cenário 6 o tempo de levantamento é de cerca de 1h e 50 min por cena, 18 vezes maior que o 5 o que faz deste o cenário mais eficaz.

Outros três cenários foram avaliados, onde três placas de madeira com a mesma dimensão da anteriormente utilizada, foram fixadas no objeto para o escaneamento da segunda época, distribuídas no centro e nas duas extremidades do objeto, possibilitando assim a observação da detecção de mudanças em diferentes regiões da nuvem de pontos, bem como com diferentes ângulos de incidência do feixe laser.

No cenário 7 o LST permaneceu instalado a uma distância de aproximadamente 20 metros do objeto em uma região central em que havia total recobrimento com uma única cena.

Ao comparar as nuvens de ponto pode-se observar que apenas a placa central foi detectada por completo, as demais fixadas nas laterais do objeto não foram completamente detectadas (FIGURA 18). O que levou aos cenários 8 e 9 onde foram realizadas duas cenas com diferentes sobreposições.

FIGURA 18 - RESULTADO DA COMPARAÇÃO DE NUVENS PARA O CENÁRIO 7



FONTE: A autora, 2018.

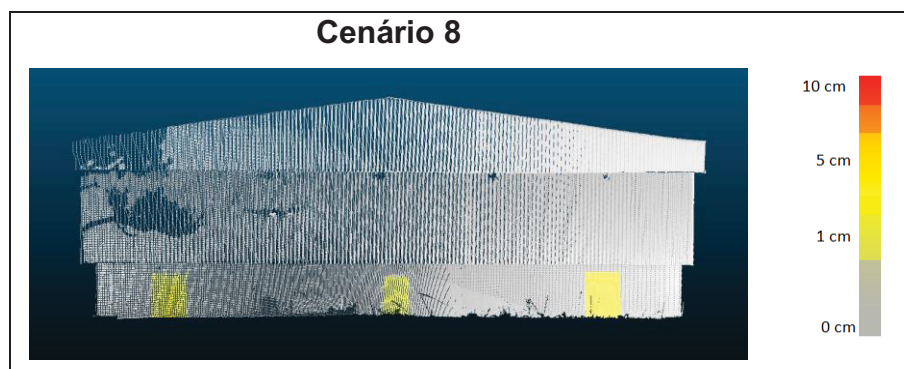
No cenário 8 foram geradas duas cenas com o mínimo de sobreposição possível na área (devido a limitações de ocupação), afim de avaliar a posição ótima para o equipamento visando aumentar a produtividade em campo diminuindo o número de cenas necessárias e ainda assim alcançar um bom desempenho na detecção das placas.

Assim como no cenário 7 aqui também foi utilizado o mesmo critério de aproximadamente 20 metros de distância do objeto. A distância entre os dois pontos de tomada das cenas foi de 40 metros. Como o comprimento total do objeto neste experimento é de 26,427 metros em ambas as posições há recobrimento total, exceto em pequenas regiões devido a obstruções. Mesmo com essa característica o teste se mostrou indispensável já que a resolução do levantamento não é uniforme e isso pode afetar o detalhamento do objeto dificultando a comparação. O registro das cenas e detecção de *outlier* foram realizados no *SCENE software* da FARO e as comparações entre as duas épocas ainda no Cloudcompare.

A partir das comparações para o cenário 8 nota-se que as placas fixadas nas extremidades foram bem detectadas, no entanto a placa central, mesmo ela

estando na área de sobreposição, não foi detectada com a mesma qualidade (FIGURA 19).

FIGURA 19 - RESULTADO DA COMPARAÇÃO DE NUVENS PARA O CENÁRIO 8

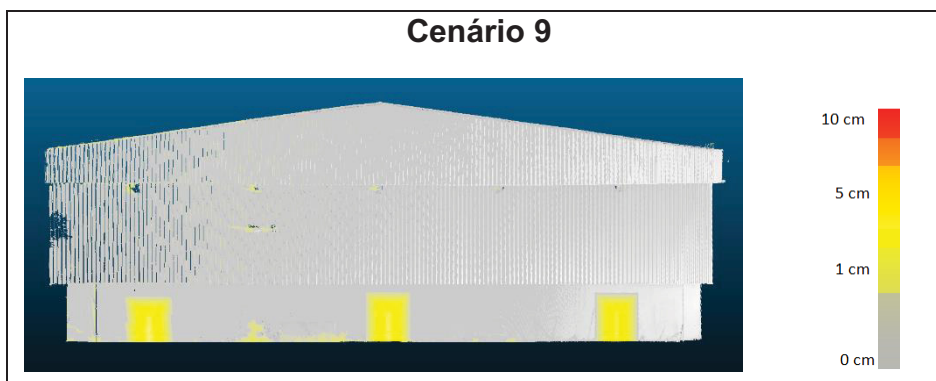


FONTE: A autora, 2018.

A placa central não foi completamente detectada no cenário 8, pela distância entre as cenas terem gerado uma resolução insuficiente na região central da nuvem, além do fato de os ângulos de incidência terem sido mais baixos, chegando a valores de 20° .

O próximo teste foi realizado diminuindo para aproximadamente 20 metros a distância entre os pontos de tomada das cenas, ao comparar as nuvens resultantes desse levantamento correspondente ao cenário 9. Pode-se observar que todas as placas foram detectadas gerando distâncias máximas observadas de 5,68 centímetros (FIGURA 20).

FIGURA 20 - RESULTADO DA COMPARAÇÃO DE NUVENS PARA O CENÁRIO 9



FONTE: A autora, 2018.

A partir dos cenários avaliados nota-se que as características de coleta de dados que apresentaram maior eficácia no que diz respeito aos resultados das

comparações e, portanto, melhor atendem aos objetivos do projeto, considerando também o tempo de execução e volume de dados, foram: distância média 20 metros tanto entre o objeto e o ponto de instalação do LST como entre a tomada das cenas, resolução mínima de 12,272 mm de distância pontual (em 10m) e qualidade 4.

Nos locais em que o ângulo de incidência entre o objeto e feixe laser são menores (nas extremidades da cena), onde foram observados valores menores que 33°, a qualidade da detecção das placas foi diretamente proporcional ao ângulo, quanto menor o ângulo de incidência pior o desempenho na comparação.

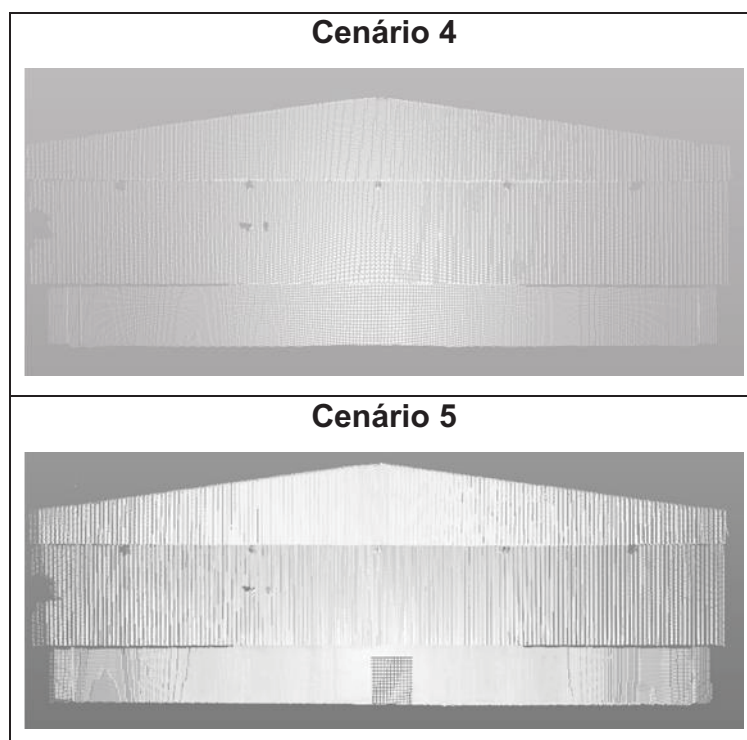
A fim de ratificar os testes realizados foram selecionados os cenários que apresentaram o melhor e o pior desempenho na comparação, e estes foram reprocessados utilizando a versão demonstrativa do *software* Geomagic Studio 12, os resultados apresentados foram muito semelhantes aos anteriores (FIGURA 21).

QUADRO 3 - CENÁRIOS SELECIONADOS PARA REPROCESSAMENTO

Cenário 1 (Reprocessado)	Cenário 5 (Reprocessado)
<p>Parâmetros do Cenário 1</p> <p>Resolução: 30,680 mm de distância pontual (em 10m)</p> <p>Qualidade: 2</p> <p>Tempo por varredura: 4 min</p> <p>Distância: 30 metros</p> <p>Número de cenas: 1</p> <p>Detecção Máxima: 2,56 cm</p>	<p>Parâmetros do Cenário 5</p> <p>Resolução: 12,272 mm de distância pontual (em 10m)</p> <p>Qualidade: 4</p> <p>Tempo por varredura: 12 min.</p> <p>Distância: 18 metros</p> <p>Número de cenas: 2</p> <p>Distância entre as cenas: 20 metros</p> <p>Detecção Máxima: 4,78 cm.</p>

FONTE: A autora, 2018.

FIGURA 21 - RESULTADO DA COMPARAÇÃO GEOMAGIC STUDIO



FONTE: A autora, 2018.

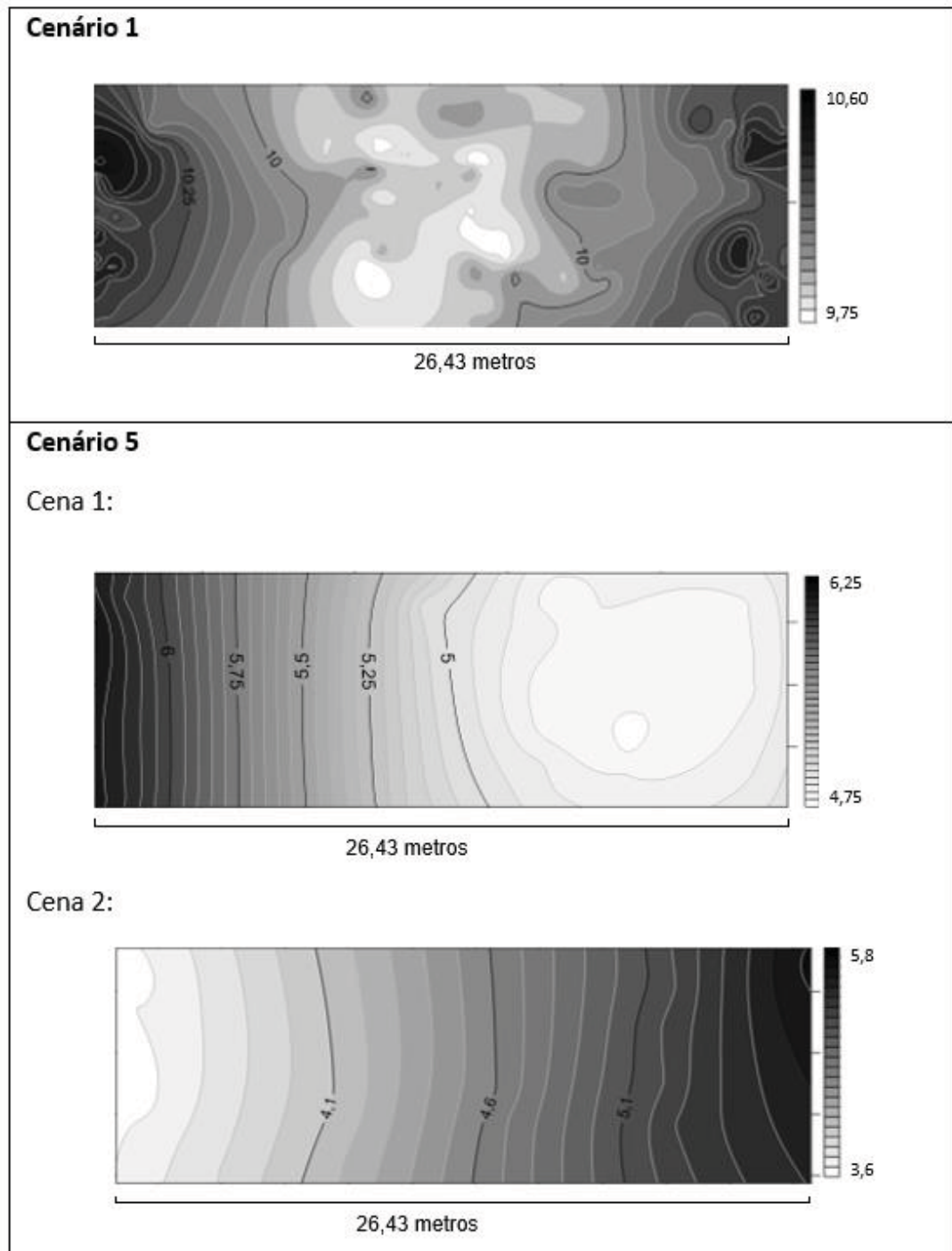
As relações entre o desempenho no pós-processamento, comparação das nuvens de pontos e a propagação encontrada na etapa de pré-análise foram verificadas para os cenários 1 e 5.

Conhecendo a precisão nominal do equipamento, as posições de instalação do LST para ambos os cenários e as dimensões do objeto, uma amostra de 100 pontos bem distribuída na área total do objeto foi simulada.

Os desvios padrões de cada ponto simulado foi calculado através das equações de pré-análise com o modelo matemático apresentado, aplicando a equação (9) combinada com a equação (12), o que resultou em incertezas máximas e mínimas de 9,27 mm e 10,78 mm respectivamente, para o cenário 1 e de 6,20 mm e 4,5 mm para o cenário 5.

Para melhor visualização do comportamento da resultante das incertezas das coordenadas, foi produzida uma superfície de isolinhas interpolada com a triangulação de Delaunay no software Surfer 13.

FIGURA 22 - INTERPOLAÇÃO DAS INCERTEZAS PARA OS CENÁRIOS AVALIADOS EM MILÍMETROS



FONTE: A autora, 2018.

Observando a figura (FIGURA 22) o cenário 1, no qual as mudanças inseridas entre a primeira e segunda campanha não foram detectadas podemos avaliar que mesmo nas regiões de menor incerteza os resultados foram superiores a 9 mm. Para o cenário 5 quanto menores os ângulos de incidência entre o raio laser e o objeto maiores os valores de incerteza, essa característica é facilmente observada

nas imagens das interpolações das incertezas tomadas pela cena 1 realizada à direita do objeto e cena 2 realizada à esquerda do objeto. Processando separadamente as cenas tomadas, as mudanças foram melhor detectadas regiões em que os desvios foram inferiores a 7 mm, com o registro entre as duas cenas todas as mudanças foram observadas.

3.4 PROPOSIÇÃO DA REDE PARA UHE DE MAUÁ

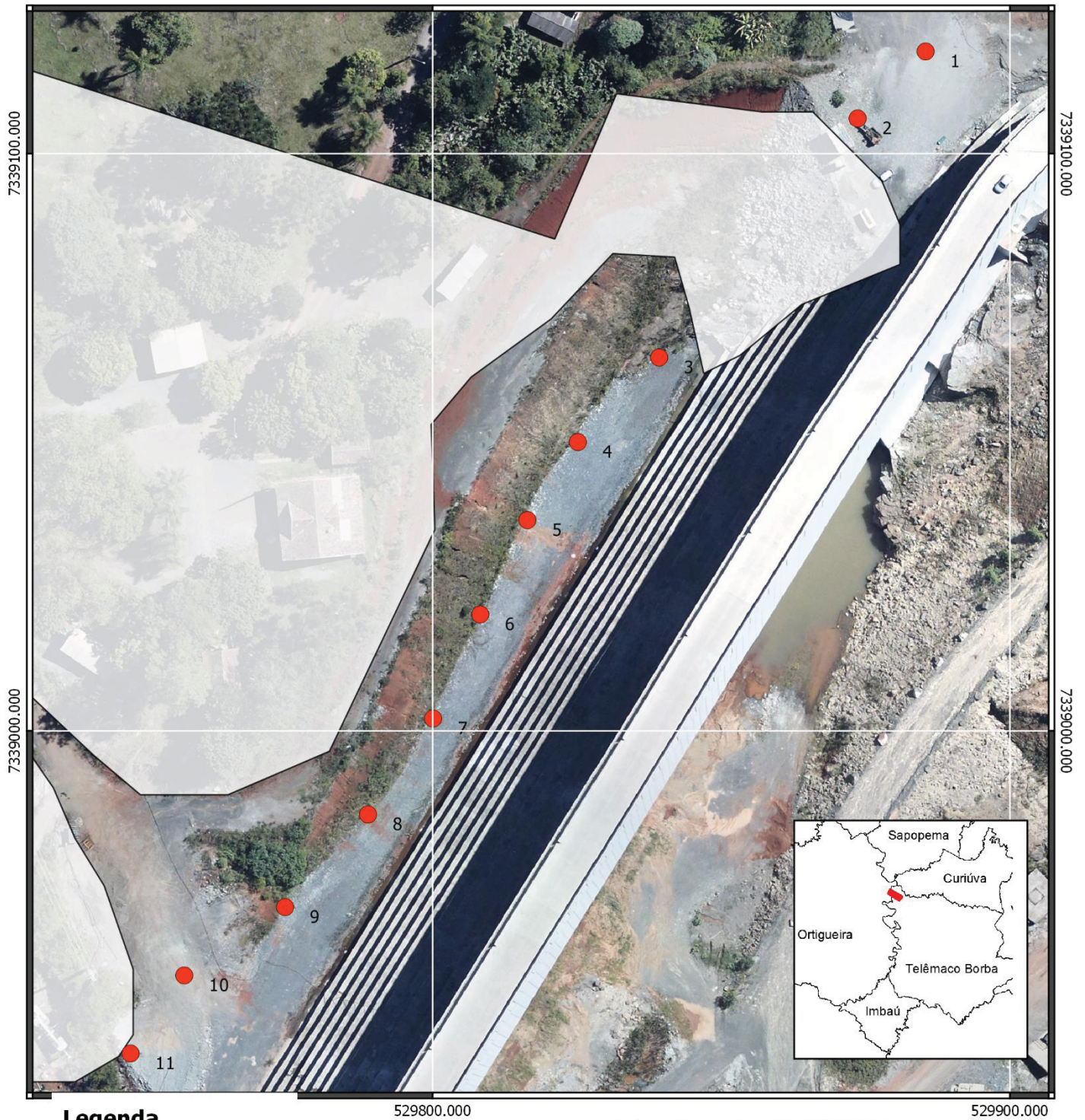
Os locais ideais para a instalação do LST devem ser escolhidos para garantir a máxima cobertura e precisão. Como visto a qualidade da medição depende também do diâmetro e retorno do sinal do LST, indicando que o ângulo de incidência e o alcance do objeto são de grande importância ao determinar a posição do mesmo.

Todos esses aspectos foram contemplados nos testes realizados para a aplicação do LST no monitoramento (Item 3.2). Uma vez testadas as configurações que melhor atendem a esse projeto os parâmetros definidos são o ponto de partida para definição da rede, além desses também foram considerados alguns tópicos listados por Andrade et. al, 2012:

- Devem ser priorizadas as posições que oferecem cobertura de área ampla sem ter obstruções na linha de visada e que produzem as menores sombras.
- Os limites mínimos e máximos de alcance do scanner devem ser cumpridos.
- A existência de ângulos de incidência baixos deve ser minimizada, nestes casos o raio laser não é tão bem refletido de volta para o scanner, o que resulta em menor precisão.
- O número de posições de varredura deve ser o mínimo possível.
- Outros fatos importantes a serem levados em consideração são: Saúde e segurança, ambiente (vibrações, vento), e elevação do scanner acima do solo.

Através da Ortoimagem de 2012, respeitando as indicações das áreas com dificuldade de ocupação mostradas na figura (15) e os critérios determinados como mais adequados a utilização do LST Faro Focus 120 na comparação de dados, foi estabelecida a hipótese 0 onde as distâncias sejam de aproximadamente 20 metros entre os pontos (FIGURA 23), além deste outros dois cenários alternativos (hipóteses 1 e 2) foram avaliados.

FIGURA 23 - HIPÓTESE 0



FONTE: A autora, 2018

Os pontos propostos têm uma distância média de 20 metros entre si, não sendo considerada a distância entre os pontos 2 e 3, que devido a área de restrição (por dificuldade de ocupação) distam 50 metros um do outro. Entre a barragem e os pontos a distância máxima também é 20 metros, na TABELA 1 encontram-se as coordenadas dos pontos propostos para o cenário 0.

TABELA 1 – COORDENADAS DOS PONTOS DA REDE PARA HIPÓTESE 0

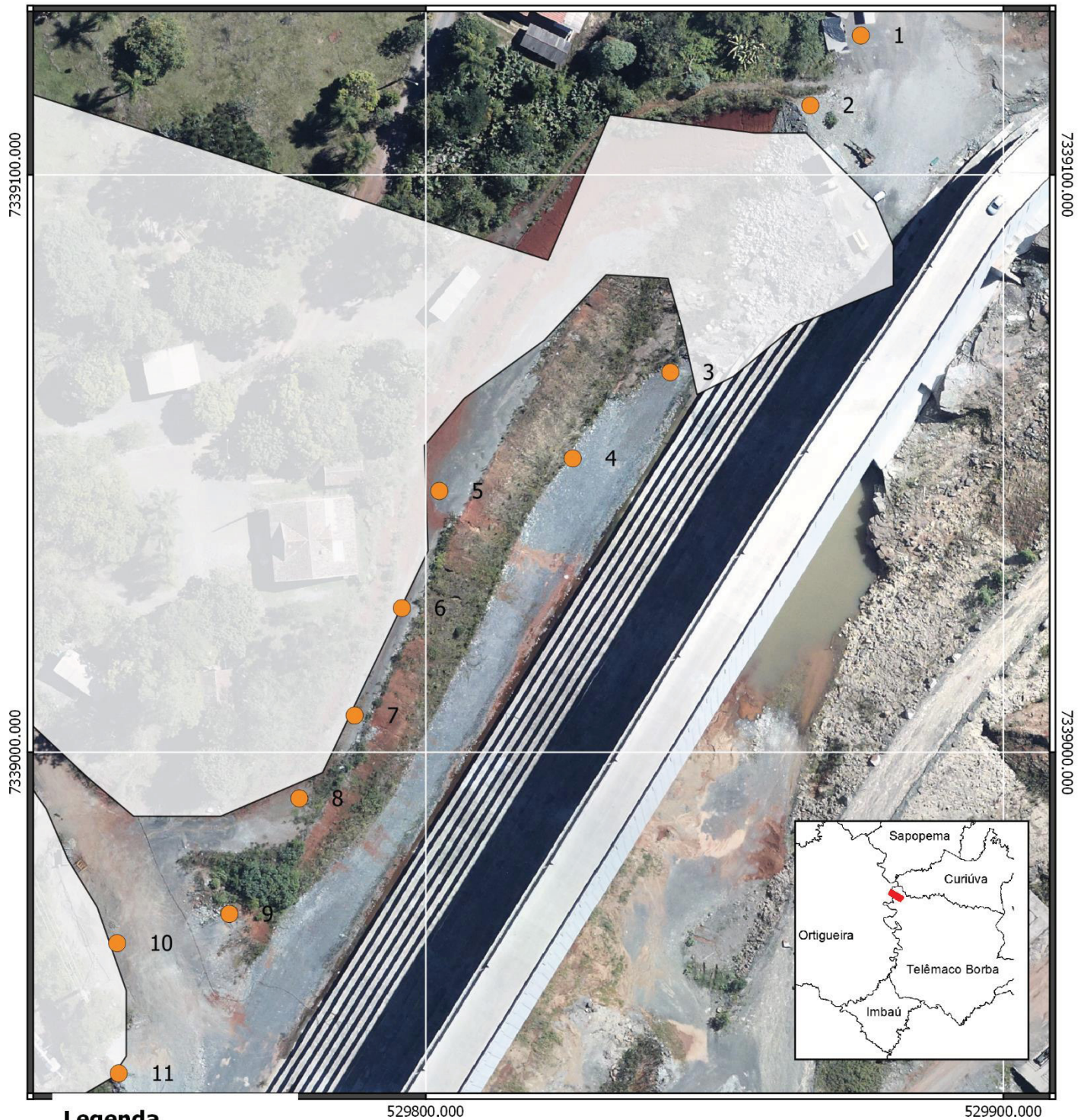
Ponto	E (m)	N (m)
1	529885,385	7339117,708
2	529873,610	7339106,101
3	529839,239	7339064,687
4	529825,153	7339050,037
5	529816,419	7339036,514
6	529808,249	7339020,174
7	529800,079	7339002,143
8	529788,810	7338985,521
9	529774,442	7338969,463
10	529756,975	7338957,630
11	529747,678	7338944,107
Coordenadas em UTM – Fuso 22 Sul.		

FONTE: A autora (2018).

Ponderando a geometria proposta em relação aos testes realizados com o LST as configurações mais adequadas para se atingir um bom desempenho na comparação entre as campanhas são: resolução 12,272 mm de distância pontual (em 10m), qualidade 4X, ângulo de abertura 180° que gera um tempo de execução por cena de cerca de 15 min.

Na primeira hipótese alternativa procurou-se avaliar as possibilidades de implantação de pontos o mais distante do objeto possível, aumentando o campo de visão e reduzido possíveis oclusões (FIGURA 24).

FIGURA 24 - HIPÓTESE 1

**Legenda**

- Pontos para o Cenário 2
 - Áreas de restrição
- 10 0 10 20 30 40 m
- 1:1000

Sistema de referência: SIRGAS 2000

Projeção: UTM

Zona: 22 S

Meridiano Central: 51°W

Cobertura aerofotogramétrica: 06/03/2012

Origem dos dados: Fiducial Engenharia/UFPR/COPEL

Edição temática: 10/02/2018

FONTE: A autora, 2018

Na hipótese 1 a média de distância entre os pontos e a barragem é de 30 metros, foram modificadas as posições dos pontos 1,2, 5, 6, 7, 8, 9, 10 em relação a hipótese 0 (TABELA 2). A comparação entre dados de duas ou mais campanhas com esta configuração demanda um aumento na resolução da varredura para 3,068 mm de distância pontual (em 10m) e consequentemente o tempo de execução para cerca de 40 min por cena.

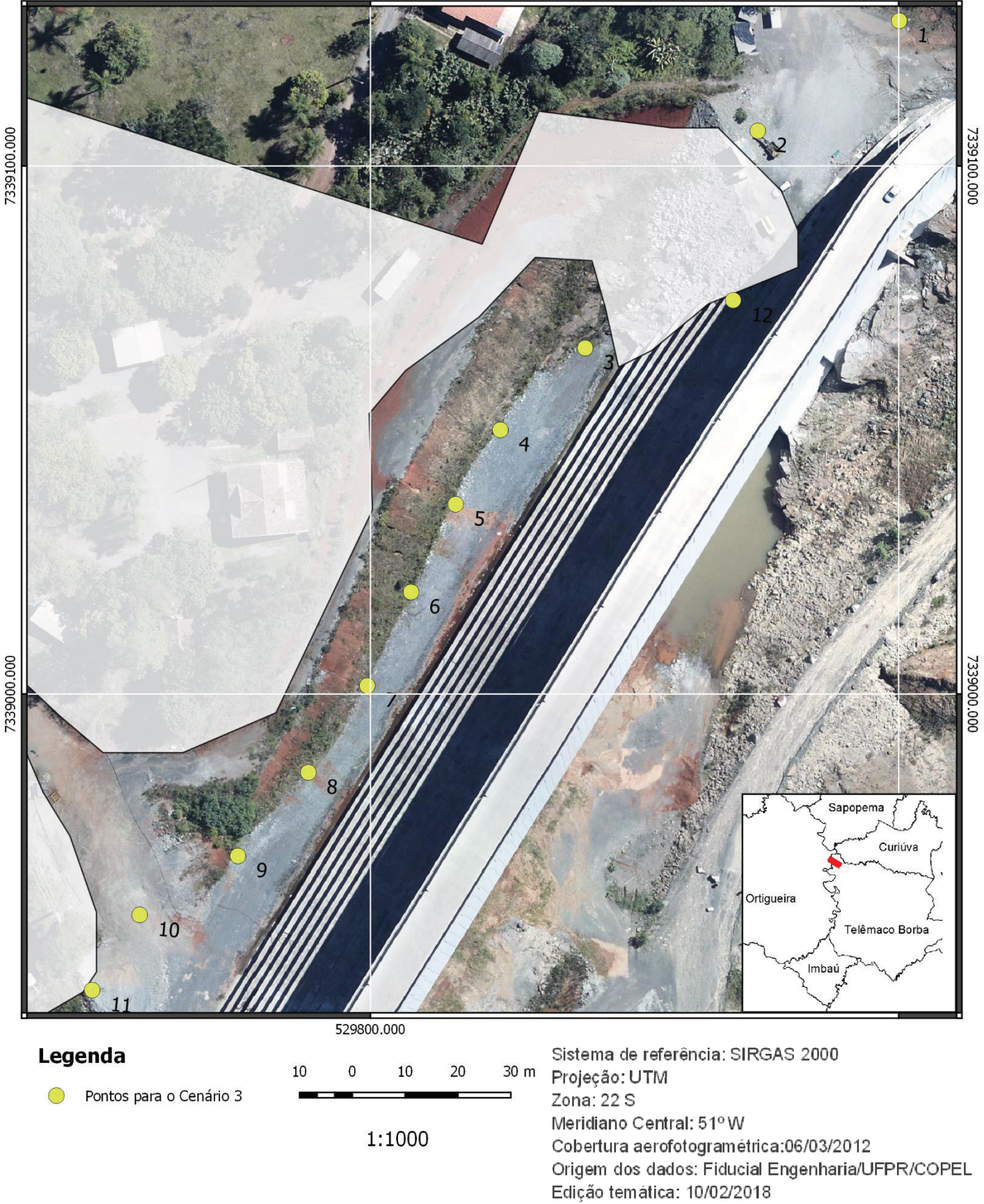
TABELA 2 – COORDENADAS DOS PONTOS DA REDE PARA HIPÓTESE 1

Ponto	E (m)	N (m)
1	529875,300	7339124,132
2	529866,567	7339112,017
3	529839,239	7339064,687
4	529825,153	7339050,037
5	529802,333	7339045,248
6	529795,853	7339024,963
7	529787,683	7339006,369
8	529778,104	7338992,001
9	529765,990	7338971,998
10	529746,551	7338966,927
11	529747,678	7338944,107
Coordenadas em UTM – Fuso 22 Sul.		

FONTE: A autora (2018).

A hipótese 2 tenta suprir as possíveis dificuldades das duas propostas anteriores, para isso foram considerados os pontos da hipótese 0, em que o tempo de execução é consideravelmente menor, no entanto o ponto 1 foi deslocado para a direita se afastando da área de maior trânsito de veículos, além disso foi adicionado um ponto, chamado 12, sobre os degraus da barragem na região de maior distanciamento das cenas nas hipóteses 0 e 1 (FIGURA 25).

FIGURA 25 - HIPÓTESE 2



Considerando a hipótese 2, cujas coordenadas se encontram na TABELA 3 as configurações mais adequadas são as mesmas utilizadas na hipótese 0, exceto do ponto 12 no qual sugere-se o aumento no ângulo de abertura para 360°, visando um melhor aproveitamento no recobrimento dos dados já que este ponto encontrasse sobre o objeto.

TABELA 3 - COORDENADAS DOS PONTOS DA REDE PARA HIPÓTESE 2

Ponto	E (m)	N (m)
1	529900,093	7339127,513
2	529866,567	7339112,017
3	529839,239	7339064,687
4	529825,153	7339050,037
5	529802,333	7339045,248
6	529795,853	7339024,963
7	529787,683	7339006,369
8	529778,104	7338992,001
9	529765,990	7338971,998
10	529746,551	7338966,927
11	529747,678	7338944,107
12	529868,664	7339074,587
Coordenadas em UTM – Fuso 22 Sul.		

FONTE: A autora (2018).

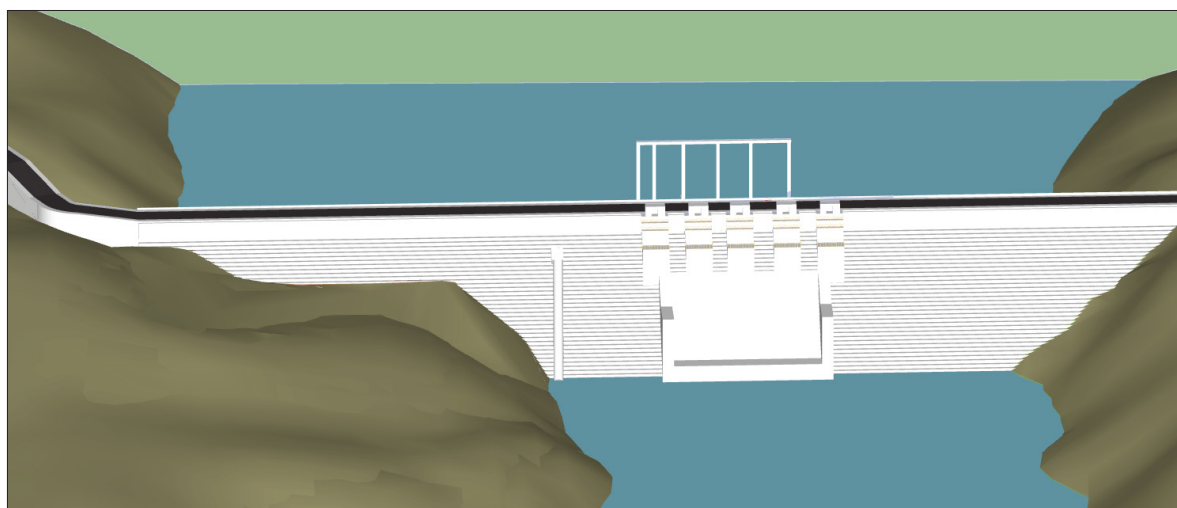
Tendo sido definidas as possíveis geometrias para a rede a próxima etapa trata-se de simular os dados que serão aplicados na pré-análise. A amostra de pontos para cada caso proposto será simulada através da modelagem da estrutura a ser escaneada.

3.5 SIMULAÇÃO DOS DADOS PARA PRÉ-ANÁLISE

Um modelo tridimensional do barramento da UHE foi desenvolvido com o intuito de facilitar a simulação dos dados para cada uma das possíveis geometrias da rede.

As dimensões extraídas das ortofotos e de dados de campanhas anteriores realizadas com técnicas de poligonação e irradiação com estação total serviram como base do modelo desenvolvido no software SketchUp 2016 (FIGURA 26).

FIGURA 26- MODELO TRIDIMENSIONAL DA BARRAGEM DA UHE MÁUA



FONTE: A autora, 2018

Uma amostra de valores para testes e cálculo das estimativas das precisões foi simulada, utilizado um conjunto de pontos objeto para cada um dos pontos propostos para a rede.

Este conjunto de dados foi definido identificando no modelo a posição do ponto de instalação do LST e então medida a distância ortogonal entre o instrumento e a barragem (menor distância). Nesta região o ângulo de incidência do raio é de 90° , para o sistema de coordenadas definido no item 3.1.1 o azimuth é igual a 0° , a partir destes foram incrementados os ângulos verticais e azimuthes em 10° até o limite de cada degrau, e então repetido o processo para cada degrau variando o ângulo vertical e mantendo o azimuth.

As distâncias foram calculadas para cada ponto utilizando os ângulos de incidência incrementados e a distância medida na ortogonal, através das relações trigonométricas de um triângulo retângulo.

$$\text{sen}(I) = \frac{D}{d} \gg d = \frac{\text{sen}(I)}{D} \quad (13)$$

Onde:

D - é a distância ortogonal entre o equipamento e a barragem (Cateto oposto ao ângulo I)

I - é o ângulo de incidência entre o feixe laser e a barragem.

d - é a hipotenusa formada pelo triângulo.

Os desvios padrões de cada ponto simulado foram calculados através das equações de pré-análise com o modelo matemático apresentado nas equações (5), (6) e (7) utilizando na matriz de variância e covariância de X as precisões nominais do FARO FOCUS 120.

Combinando as equações (9) e (11) foram gerados um conjunto de incertezas para os pontos objeto de cada uma das cenas em todas as redes propostas a partir dos quais se deram as análises apresentadas no tópico seguinte.

4 RESULTADOS

Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos da etapa de pré-análise para cada uma das três hipóteses propostas, as simulações matemáticas e incertezas obtidas em cada situação, além da comparação entre os resultados obtidos para as redes, a fim de buscar a configuração ótima.

4.1 PRÉ-ANÁLISE DAS REDES PROPOSTAS

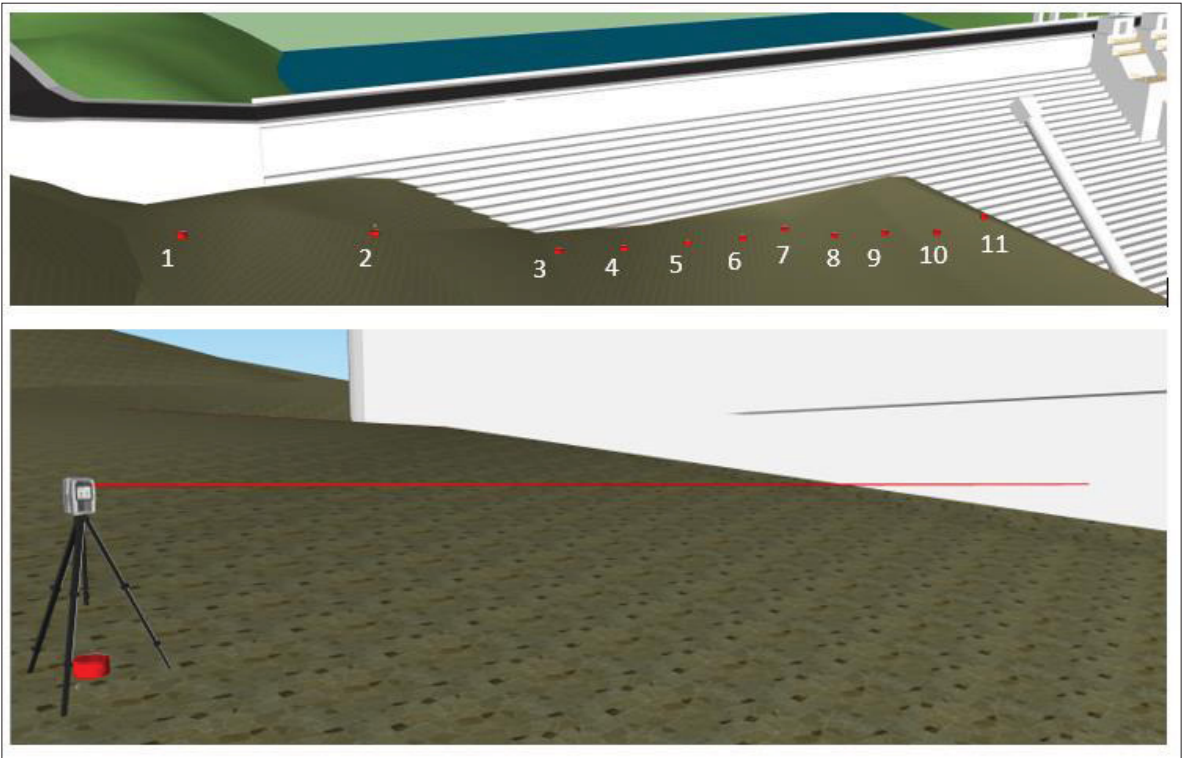
A análise matemática da propagação do erro angular e linear de cada uma das varreduras com LST para as redes propostas foi possível a partir da simulação de dados com auxílio do modelo tridimensional da barragem, onde foram localizados os pontos da rede em cada hipótese proposta e assim simulados uma amostra dos dados brutos a serem medidos pelo equipamento no momento do levantamento em campo (FIGURA 27).

Com as incertezas posicionais dos pontos objeto para cada uma das cenas planejadas, foram geradas isolinhas interpoladas com a triangulação de Delaunay no software Surfer 13, a serem utilizadas para facilitar a visualização e tomada de decisão na determinação da localização ótima dos pontos de instalação do LST.

Foram simuladas amostras de pontos incrementados em 15 graus horizontal e verticalmente, considerando um ângulo de incidência mínimo entre o raio laser e objeto de 20 graus. Cerca de 400 observações foram simuladas a partir de cada um dos onze pontos da hipótese 0.

A TABELA 4 traz as observações simuladas dos azimutes, ângulos zenitais e distâncias inclinadas dos pontos que se encontram na região central da primeira amostra na hipótese 0, sendo 82 dos 400 pontos simulados na primeira localização do LST desta hipótese.

FIGURA 27 - LOCALIZAÇÃO DOS PONTOS NO MODELO PARA HIPÓTESE 1



Fonte: A autora, 2018.

TABELA 4 - AMOSTRA DE DADOS SIMULADOS PARA PONTO 1

continua

Ponto	Azimute (°)	Âng. Zenital (°)	Dist. Inclínada(m)	Ponto	Azimute (°)	Ângulo Zenital (°)	Dist. Inclínada (m)
1	110	80	21,716	41	110	50	24,446
2	100	80	21,706	42	100	50	24,279
3	90	80	21,696	43	90	50	24,112
4	80	80	21,686	44	80	50	23,945
5	70	80	21,676	45	70	50	23,778
6	60	80	21,666	46	60	50	23,611
7	50	80	21,656	47	50	50	23,444
8	40	80	21,646	48	40	50	23,277
9	30	80	21,636	49	30	50	23,11
10	20	80	21,626	50	20	50	22,943
11	10	80	21,616	51	10	50	22,776
12	0	80	21,606	52	0	50	21,766
13	90	70	22,856	53	90	60	21,756
14	80	70	22,686	54	80	60	21,746
15	70	70	22,516	55	70	60	21,736
16	60	70	22,346	56	60	60	21,726

conclusão

Ponto	Azimute (°)	Âng. Zenital (°)	Dist. Inclinação(m)	Ponto	Azimute (°)	Ângulo Zenital (°)	Dist. Inclinação (m)
17	50	70	22,176	57	50	60	21,716
18	40	70	22,006	58	40	60	21,706
19	30	70	21,836	59	30	60	21,696
20	20	70	21,666	60	20	60	21,686
21	10	70	21,496	61	10	60	21,676
22	0	70	21,326	62	0	60	21,666
23	10	70	21,496	63	10	60	21,676
24	20	70	21,666	64	20	60	21,686
25	30	70	21,836	65	30	60	21,696
26	40	70	22,006	66	40	60	21,706
27	50	70	22,176	67	50	60	21,716
28	60	70	22,346	68	60	60	21,726
29	70	70	22,516	69	70	60	21,736
30	80	70	22,686	70	80	60	21,746
31	90	70	22,856	71	90	60	21,756
32	0	90	21,406	72	0	40	23,234
33	10	90	21,396	73	10	40	23,356
34	20	90	21,386	74	20	40	23,478
35	30	90	21,376	75	30	40	23,6
36	40	90	21,366	76	40	40	23,722
37	50	90	21,356	77	50	40	23,844
38	60	90	21,346	78	60	40	23,966
39	70	90	21,336	79	70	40	24,088
40	80	90	21,326	80	80	40	24,21

Fonte: A autora, 2018.

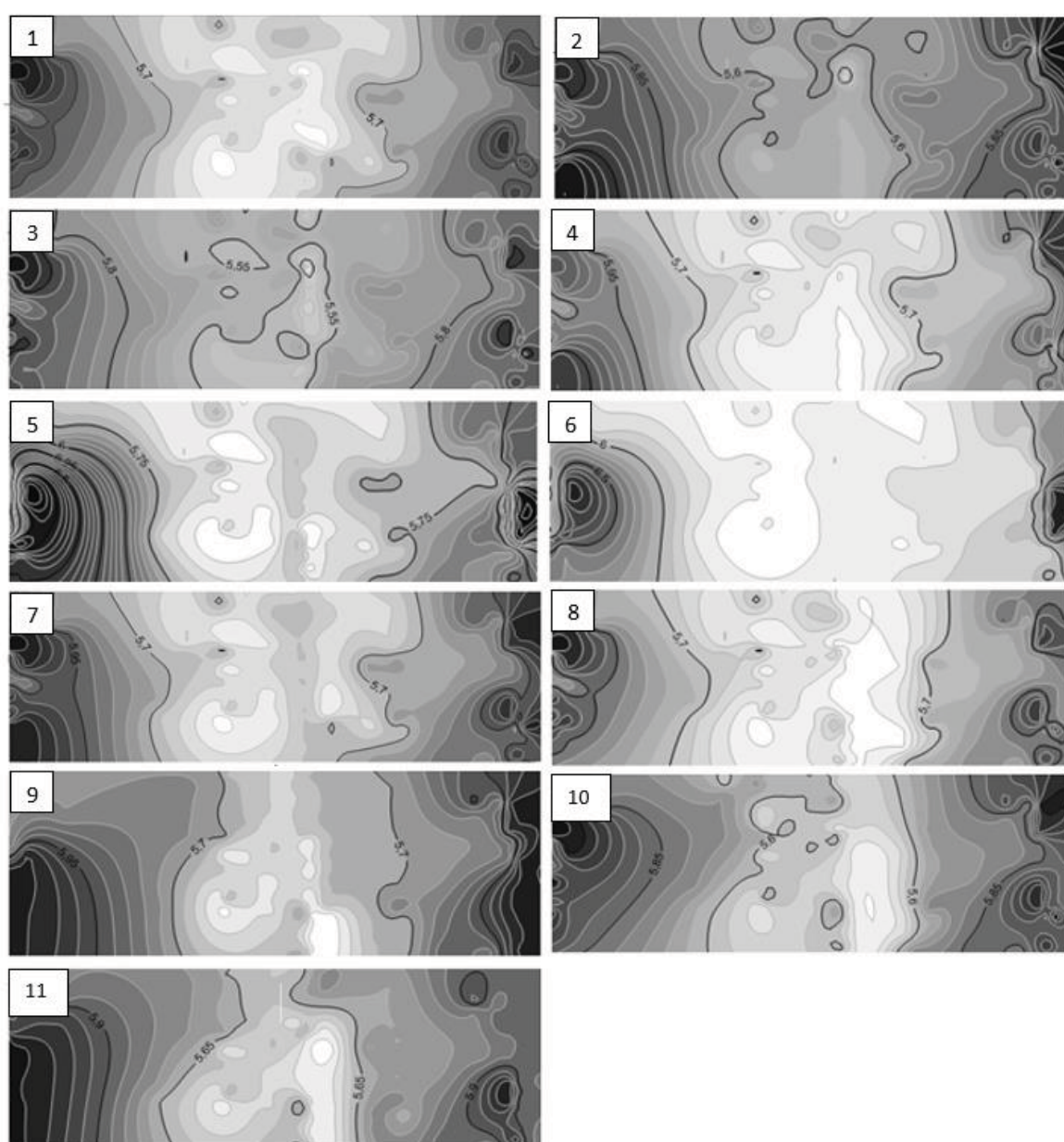
Analizando os dados gerados da pré-análise e as isolinhas da resultante das coordenadas (FIGURA 28) completas da rede para hipótese 0 encontra-se o desvio padrão médio de 6 mm. Para todas as cenas avaliadas as incertezas são, como já esperadas, crescentes do centro da cena para as extremidades. Na região central tanto as distâncias quanto o diâmetro do raio laser são menores e apresentam em todos os 11 pontos incertezas entre 5 e 6 mm, aumentando gradativamente para valores entre 7 e 8 mm nas extremidades consideradas, caso sejam extrapolados os limites de incidência do raio estes valores tornam-se ainda maiores.

Os pontos 2 e 3 por estarem mais distantes entre si mostram regiões de sobreposição em que as incertezas de ambas as cenas são superiores a 7 mm. O

que, de acordo os testes realizados no item 3.3 pode ser desfavorável a comparação nessa região.

Os demais pontos apresentaram comportamentos ditos minimamente favoráveis a capacidade de comparação de dos dados entre duas ou mais campanhas de monitoramento, de acordo com os parâmetros estipulados nesta pesquisa. A figura 28 apresenta os valores das incertezas para a hipótese 0. Os valores estão em milímetros.

FIGURA 28 - ISOLINHAS DAS INCERTEZAS PARA HIPOTESE 0 EM MILÍMETROS



FONTE: A autora, 2018.

Como recurso de representação gráfica da precisão das coordenadas, aliado as isolinhas, a fim de se obter maior detalhamento do comportamento dos dados e auxílio as análises foram também geradas as elipses de erro para cada conjunto de dados.

Como o comportamento espacial das elipses ocorre de forma similar entre os pontos vizinhos, para cada cena foram representadas graficamente nove pontos, sendo eles distribuídos entre o início, meio e fim de cada amostra da cena. Com auxílio do software Matlab R2012a, as mesmas foram plotadas sobre a imagem referenciada das isolinhas, a FIGURA 29 traz esse resultado para o ponto 1 da hipótese 0.

Para cada elipse os desvios padrões máximo e mínimo correspondem aos semieixos maior e menor respectivamente, o desvio padrão da componente vertical foi representado com uma barra associado a elipse do ponto.

FIGURA 29 - ELIPSES GERADAS PARA OS PONTOS OBJETO A PARTIR DO PONTO 1 EM MILÍMETROS (HIPÓTESE 0)



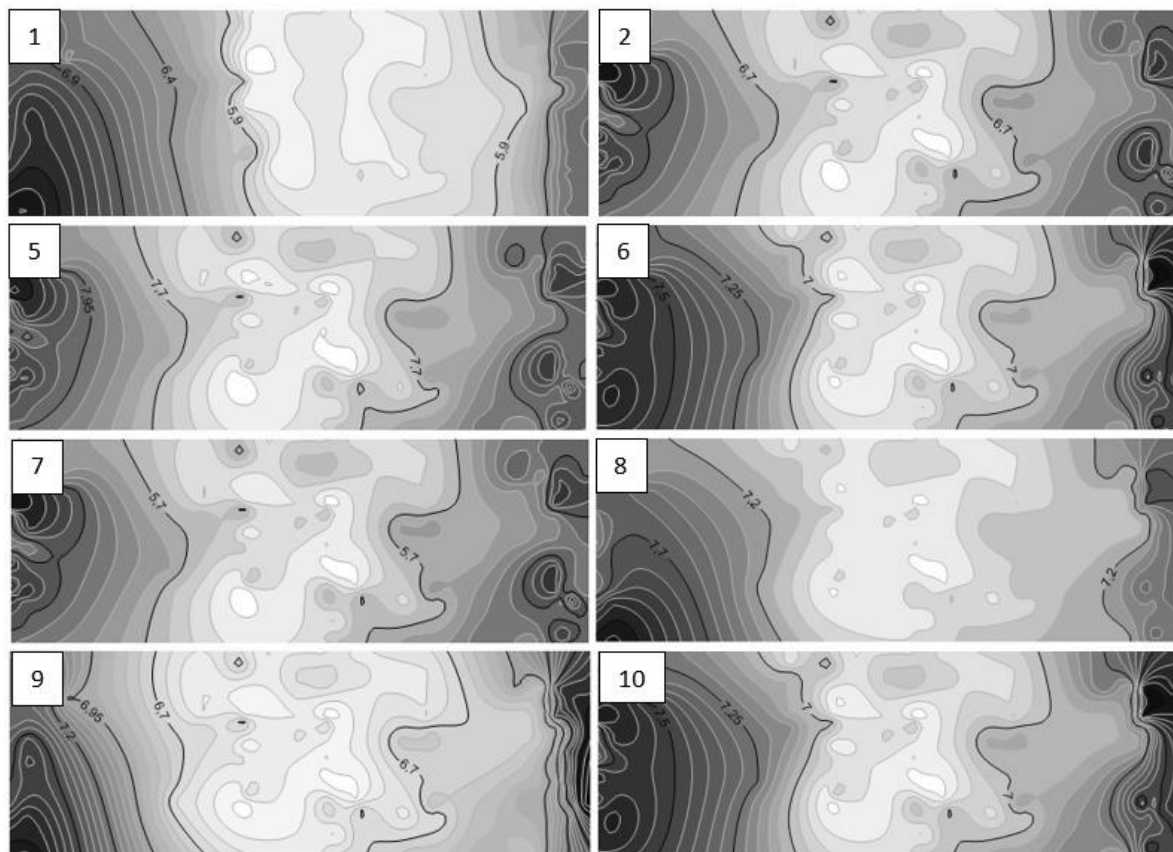
FONTE: A autora, 2018.

Ao avaliar as elipses para as cenas verifica-se um comportamento similar entre a maioria dos pontos, tendo sido mais relevantes nos pontos 2 e 3.

Para a hipótese 1 foram modificadas as posições dos pontos 1, 2, 5, 6, 7, 8, 9, e 10, e, portanto, recalculados seguindo os mesmos padrões da hipótese 0, os dados brutos simulados no modelo para esses pontos. Bem como as propagações de erros e geradas as isolinhas para as novas incertezas (FIGURA 30).

Já que os pontos 3 e 4 se mantiveram tal qual na hipótese 0 eles mantêm os mesmos resultados registrados nos primeiros cálculos.

FIGURA 30 - ISOLINHAS DAS INCERTEZAS PARA HIPOTESE 1 EM MILÍMETROS



FONTE: A autora, 2018.

Verifica-se que para essas mudanças realizadas as incertezas médias dos pontos ficaram em torno de 7 mm, tendo sido maiores nos pontos 5 e 10 por estarem mais distantes e contemplarem ângulos de incidência menores entre o raio e a barragem que os demais pontos propostos nesta hipótese. Paralelamente a hipótese 0, neste caso os valores de incerteza se mostram superiores nos pontos modificados, tendo entre os pontos 9, 10, 11 e os pontos 4, 5, 6 regiões de sobreposição em que as incertezas de ambas as cenas são superiores a 9 mm.

Tendo em vista a resolução e qualidade sugeridas para essa configuração, haverá comparação de dados mesmo nestes pontos, no entanto o tempo de execução e volume dados será consideravelmente maior.

Para a hipótese 0 onde o tempo médio para cena gira em torno de 15 minutos, o tempo total do levantamento será de no mínimo 2h e 45 minutos, sem considerar o deslocamento do operador entre cada ponto e os processos

intermediários como instalação do instrumento. Já para a hipótese 1 como os pontos estão mais distantes da barragem foi necessário o aumento da densidade de pontos e da qualidade do levantamento, isso acarretou um aumento no tempo mínimo para 10 horas. É importante salientar que as estimativas de tempo foram baseadas nos levantamentos sem utilizar a cor real, pois o dado fundamental neste caso é métrica do objeto, para o caso de se realizar também as fotos utilizadas para pigmentação real na nuvem de pontos o tempo estimado será ainda maior.

Assim como na hipótese 0, foram geradas as elipses de erro para uma amostra de pontos em cada conjunto de dados dos pontos modificados (FIGURA 31).

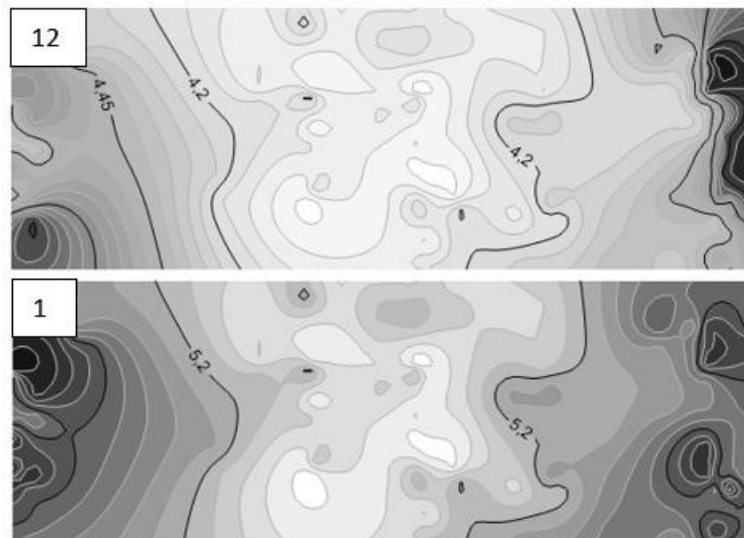
FIGURA 31 - ELIPSES GERADAS PARA OS PONTOS OBJETO A PARTIR DO PONTO 1 EM MILÍMETROS (HIPÓTESE 1)



FONTE: A autora, 2018

A hipótese 2, proposta realizada para suprimir os eventuais problemas encontrados nas duas configurações anteriores, foram utilizados os pontos e configurações do equipamento da hipótese 0, modificando apenas o 1 e acrescentando um ponto entre os pontos 2 e 3, chamado ponto 12. Logo foram gerados novos dados e interpolações de isolinhas apenas para essas modificações.

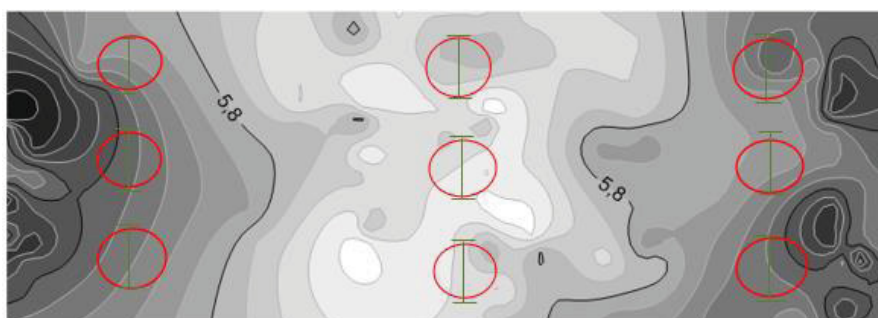
FIGURA 32 - ISOLINHAS DAS INCERTEZAS PARA HIPÓTESE 2 EM MILÍMETROS



FONTE: A autora, 2018.

O ponto 1 foi deslocado para a direita do objeto ficando mais distante do ponto 2 tornando mais segura sua ocupação devido a característica da região, assim as incertezas bem como as elipses de erros (FIGURA 33) a partir deste ponto se comportam de maneira semelhante aos demais já calculados para hipótese 1. No entanto, como haverá regiões de sobreposição onde esses valores ultrapassam 6 mm para ambas as cenas sobrepostas neste ponto, o levantamento deverá ser realizado com uma resolução maior em relação aos demais pontos.

FIGURA 33 - ELIPSES GERADAS PARA OS PONTOS OBJETO A PARTIR DO PONTO 1 EM MILÍMETROS (HIPÓTESE 2)



FONTE: A autora, 2018.

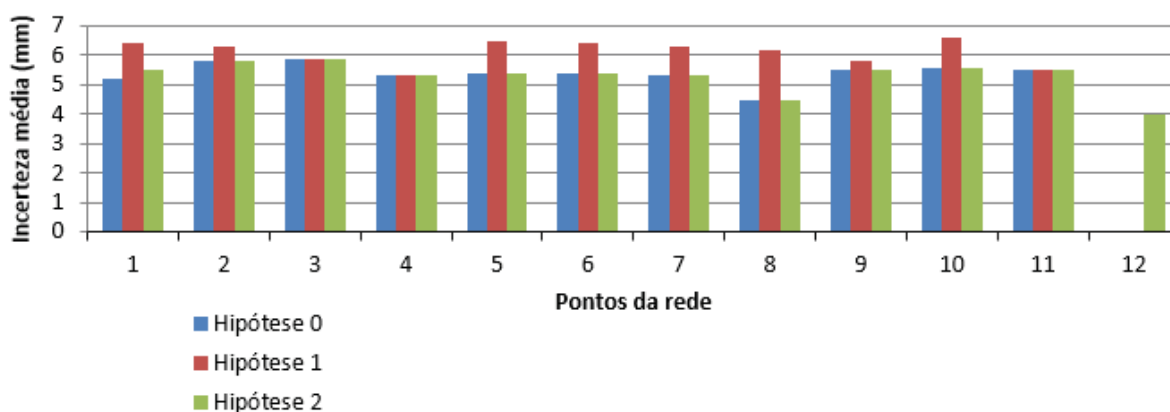
Levando em conta a adição do ponto 12 e as modificações sugeridas na configuração do LST na tomada de dados partir dos pontos 1 e 12, o tempo por cena para essa hipótese será diferenciado gerando um tempo total distinto da hipótese 0 que foi base para essa proposta.

Com o aumento no ângulo de varredura o tempo estimado para a tomada da cena no ponto 12 será de aproximadamente 20 min. Para o ponto 1 considerando a nova configuração de resolução e qualidade para 7,6 mm de distância pontual em 10 metros e 3x respectivamente, o tempo será de 25 min.

Aliado aos demais pontos onde não houveram mudanças cujo tempo estimado é 15 min, o tempo total mínimo esperado para o levantamento completo da hipótese 2 será de aproximadamente 3 horas e 15 minutos. Consideravelmente menor quando comparado a hipótese 1.

Em busca de uma análise global das diferenças entre as precisões médias, foi criado um gráfico com a média das incertezas para cada ponto da rede em relação as 3 hipóteses propostas.

GRÁFICO 1 - INCERTEZAS MÉDIAS POR PONTOS DAS HIPÓTESES PROPOSTAS



FONTE: A autora, 2018.

As incertezas médias dos dados da pré-análise em cada ponto proposto são maiores para hipótese 1. Nos pontos 2, 4 e 11 as medias se mantiveram nas três propostas, isso se deu pelo fato de não terem havido mudanças nesses pontos.

Entre as hipóteses 0 e 2 os resultados são semelhantes, sendo melhores se comparados a hipótese 1.

O ponto 12 aparece no gráfico contendo apenas a incerteza média da hipótese 2 por ter sido inserido apenas para este caso.

Por conseguinte, a hipótese 2 mostra-se mais eficiente, já que apresenta as melhores elipses e prevê os possíveis problemas que seriam gerados ao se comparar os dados entre as campanhas na hipótese 0.

A hipótese 1 tornou-se inviável, tanto do ponto de vista das elipses de erros (se comparada as demais) como pelo tempo de execução que é substancialmente maior. Além do aumento excessivo no número de dados e consequentemente no tamanho do arquivo.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O desenvolvimento desta pesquisa focou-se na proposição de um projeto de primeira ordem de uma rede de monitoramento empregando o LST modelo Faro Focus 120, com estudo de caso para a UHE de Mauá.

O monitoramento de grandes estruturas por métodos ditos geodésicos já se consagrou através de técnicas de levantamento de pontos sobre a estrutura que permitem a determinação com grande eficácia de deslocamentos absolutos e estudos de comportamentos temporais destas estruturas. Estes levantamentos têm sido largamente empregados por meio dos métodos clássicos, com uso de estações totais, por exemplo. A grande motivação do presente estudo consistiu em otimizar a aplicação do LST no monitoramento, como sendo uma tecnologia que possibilita uma análise global da estrutura aumentando consideravelmente o número de dados coletados em um tempo reduzido se comparado aos métodos tradicionais.

A otimização do emprego do LST no monitoramento da UHE Mauá partiu do princípio de se planejar a posição dos pontos da rede para coleta de dados em campo, de maneira que estes sejam fixos e possibilitem a reocupação em diversas campanhas a serem realizadas periodicamente. Esta definição foi norteada a partir dos princípios de utilização dos dados dentro do monitoramento e de como esses dados se comportam na etapa de processamento em conformidade com as características de coleta em campo. A partir dessas análises foi constatado que um projeto de monitoramento que pretende gerar visão global do objeto utiliza softwares e funções específicas de comparação de nuvens de pontos, no entanto o bom funcionamento destas funções está relacionado diretamente aos critérios de coleta de dados em campo.

Com o intuito de estabelecer esses critérios foram realizados nove diferentes testes nos quais houve uma simulação de duas campanhas distintas para cada proposição realizada. Nestas campanhas foi introduzida uma mudança dimensional controlada na estrutura a fim de verificar a potencialidade de detecção dessas mudanças ao se comparar as nuvens de pontos coletadas com diversas configurações. Foram testadas diferentes distâncias do objeto variando também os parâmetros de varredura como resolução, qualidade e faixa de varredura.

Dos nove cenários propostos apenas cinco tiveram a mudança introduzida detectada. Nos três primeiros cenários o equipamento foi instalado a uma distância aproximadamente 30 metros do objeto, destes apenas o levantamento realizado com a maior resolução disponível no equipamento conseguiu detectar a mudança na cena. Os cenários 4, 5 e 6 foram medidos reduzindo a distância inicial para 20 metros, o que melhorou substancialmente os resultados alcançados tendo tido o reconhecimento das mudanças com maior eficiência onde a resolução maior foi utilizada. No entanto, com a resolução máxima o tempo de levantamento foi consideravelmente maior.

Foi analisada a detecção em diferentes regiões da nuvem de pontos, pode-se concluir que com apenas uma cena, nas extremidades da mesma as mudanças não são detectadas (cenário 7), realizando duas cenas (cenários 8 e 9) o resultado satisfatório consistiu no cenário em que as cenas distaram entre si no máximo 20 metros (cenário 9).

A proposição de três diferentes hipóteses para a geometria da rede se deu com base nos critérios definidos nos nove cenários testados e com o auxílio das ortofotocartas da UHE produzidas em 2012, onde foram identificadas áreas em que haveriam dificuldade de implantação de pontos, devido principalmente a obstáculos físicos. Essas considerações trouxeram a limitação de instalação a no máximo 30 metros da barragem, a hipótese 1 considera este cenário, este foi o primeiro cenário alternativo a hipótese 0 em que a distância média entre os pontos e a barragem foi de 20 metros.

Para a primeira hipótese (hipótese 0) foram escolhidos 11 pontos nos quais as configurações necessárias têm a resolução com distância pontual de 12,73 mm em 10 metros, qualidade 4, ângulo de abertura 180°, que resulta em um tempo de execução por cena de cerca de 15 min.

Na primeira hipótese alternativa procurou-se avaliar as possibilidades de implantação de pontos o mais distante do objeto possível, aumentando o campo de visão e ocupando locais com menor possibilidade de trânsito de pessoas e equipamentos, no entanto, as configurações necessárias para se alcançar os resultados esperados geram a necessidade de um aumento na qualidade e na resolução do levantamento, consequentemente o tempo de execução por cena passar a ser três vezes maior.

A hipótese 2 apresentada foi baseada na adição de um ponto a hipótese 0, e deslocamento do ponto 1, tendo assim uma alternativa que buscou suprir as deficiências da proposição anterior.

Tendo as posições para cada hipótese foram aplicadas as equações de pré-análise com o modelo de equações para um levantamento com LST. Na geração das incertezas posicionais dos pontos objeto foram também considerados os efeitos da largura do feixe laser, variável ao longo da nuvem e que provoca uma incerteza inerente na localização angular do ponto no qual a medição é feita. Chegando a valores de incertezas médias de 5 mm para a hipótese 0, de 7,5 mm para a hipótese 1 e de 6 mm para a hipótese 2.

Fundamentado nas incertezas posicionais dos pontos foi possível gerar para cada cena uma interpolação de dados visualizadas com isolinhas que foram utilizadas para facilitar a visualização e tomada de decisão na determinação da localização ótima dos pontos como sendo a hipótese 2.

Ainda com o intuito de produzir material de apoio à tomada de decisão entre as hipóteses propostas foram calculadas as elipses de erro para uma amostra de pontos em cada cena, as mesmas foram plotadas sobre as isolinhas. Com as quais foi possível avaliar que dentre elas a hipótese que apresentou os maiores desvios foi a hipótese 1, tendo a hipótese 0 e a hipótese 2 apresentado resultados semelhantes entre si.

Tais resultados, portanto apontam para a escolha da hipótese 2 como melhor configuração posicional para os pontos na UHE Mauá empregando o *Laser Scanner* Terrestre FARO FOCUS 3D. Esta hipótese traz além de elipses de erro menores comparada a hipótese 1, também se mostra mais eficiente já que prevê possíveis problemas a serem encontrados nos dados da hipótese 0 e ocasiona um tempo de execução e tamanho de dados menor, o que otimiza a produtividade e facilita a manipulação dos dados no processamento.

O monitoramento com LST traz uma potencialidade que tende a ser crescente com a evolução tecnológica e popularização deste equipamento, incorporar essa e tecnologia como possibilidade de adicionar novos tipos de informações aos demais dados oriundos das consagradas técnicas de monitoramento, é fundamental para enriquecimento da pesquisa dentro do âmbito de monitoramento de estruturas empregando métodos geodésicos.

5.1 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Analisar o efeito do espalhamento do raio laser considerando o comportamento do efeito de borda nos degraus da Barragem.
- Expandir a rede de monitoramento com LST para recobrir todo o barramento da UHE.
- Analisar os efeitos das propriedades ópticas dos materiais como a superfície do material, umidade e iluminação. Se relevantes, como a posição da rede pode minimizar esses efeitos.
- Propor formas de minimizar os efeitos das incertezas dos dados nas regiões mais altas da barragem.
- Avaliar métodos de pré-análise que considerem o processamento de comparação de dados através da métrica de geração de superfícies planas no levantamento com o LST.
- Testar a funcionalidade da detecção automática de *outliers* no processamento da nuvem de pontos da barragem.
- Realizar um levantamento prévio para testar a configuração da rede escolhida antes de materializar definitivamente a rede de monitoramento.
- Realizar um levantamento teste quando as comportas da barragem estiverem abertas a fim de analisar sua eficácia nestas situações.
- Testar diferentes softwares e diferentes configurações para a criação de planos ou malhas para comparações de nuvens;
- Realizar a integração entre os pontos da rede e a rede de monitoramento absoluta já implantada na região.
- Projetar os pilares para a construção da rede.

REFERÊNCIAS

- AMORIM, G. P. **Ajustamento de observações**. Coordenadoria de recursos didáticos. Centro Federal de Educação Tecnológica do Espírito Santo. Espírito Santo, 2006.
- ANDRADE, H. J. L. F. **Varredura a laser aplicada na reconstrução 3D de bens materiais do patrimônio histórico de Igarassu e Olinda**. 101 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação) - Centro de Tecnologia e Geociências da Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2012.
- BENITO-CALVO, A.; GUTIÉRREZ, F.; MARTÍNEZ-FERNÁNDEZ, A.; CARBONEL, D.; KARAMPAGLIDIS, T.; DESIR, G.; SEVIL, J.; GUERRERO, J.; FABREGAT, I.; GARCÍA-ARNAY, Á. **4D Monitoring of Active Sinkholes with a Terrestrial Laser Scanner (TLS): A Case Study in the Evaporite Karst of the Ebro Valley, NE Spain**. *Remote Sens.* 2018, 10, 571.
- BEIRÃO, C. C. B. **O potencial do laser scanner terrestre para o inventário do patrimônio arquitetônico**. 79 f. Dissertação (Mestrado). Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2011.
- BOEHLER, W.; HEINZ, G.; MARBS, A. **The Potential of Non-Contact Close Range Laser Scanners for Cultural Heritage Recording**. CIPA - International Symposium, Proceedings. Potsdam, Germany, 2001.
- CHAVES, J. C. **Uso da tecnologia GPS na monitoração de deformações: sistema, etapas e experimentos**. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2001.
- DALMOLIN, Q.; SANTOS, D. R. **Sistema Laserscanner: Conceitos e Princípios de Funcionamento**. 3. ed. Curitiba: UFPR. 97p. 2004.
- DUARTE, J. M. G.; MORAES R. B.; OLIVEIRA, C. A.; CARDOSO, R. M. **Alguns Aspectos Geotécnicos Peculiares do Projeto da UHE Mauá**. In: VII Simpósio de Prática de Engenharia Geotécnica da Região Sul, Foz do Iguaçu, PR. Geosul, 2010
- FAGGION, P. L.; SOARES, M. A.; NADAL, C. A.; VEIGA, L.A.K. **RELATÓRIO TÉCNICO 01-2012 PROJETO PD6491-0227/2011 - MONITORAMENTO GEODÉSICO**. UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ. CURITIBA, 2012.
- FERNANDES, R. N. S. **Avaliação do método de nivelamento trigonométrico, técnica *Leap-Frog*, na determinação de recalque em grandes estruturas: estudo de caso para a UHE Mauá**. 112 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Geomática, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2012.

GEMAEL, C. **Introdução ao Ajustamento de Observações: Aplicações Geodésicas**. Curitiba: ed. UFPR, 1994. 319p. 1.ed

GORDON, S.; LICHTI, D.; STEWART, M. **Application of high-resolution, groundbased laser scanner for deformation measurements**. Em: 10th FIG, Orange, California, US. Proceedings. 2001.

GRAFAREND, E. W.; SANSONO, F. **Optimization and design of geodetic networks**, Berlin: Springer, 1985.

GRANEMANN, D. C. **Estabelecimento de uma rede geodésica para o monitoramento de estruturas: Estudo de caso na Usina Hidrelétrica Salto Caxias**. 121 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Geomática, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2005.

HELMERT, F. R. **Studien über rationelle Vermessungen im Gebiet der Hoheren Geodäsie**. Z. Math Phys Schömilch. V. 13 p. 73-120 e 163-168, 1868.

IBGE. **Resolução PR. nº22, de 21 de julho de 1983**. Dispõe sobre as Especificações e Normas para Levantamentos Geodésicos em Território Brasileiro. Boletim de Serviço 1602 (Suplemento). Rio de Janeiro. 1 Ago. 1983.

JUNG, I. (1924). **Über die günstigste Gewichtsverteilung in Basisnetzen**. Akadem. Abh. Uppsala, 1924.

KLEIN, I. **Proposta de um novo método para o planejamento de redes geodésicas**. 148 f. Tese (Doutorado) – Curso de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014.

KUANG, E. P. **Geodetic Network Analysis and Optimal Design: concepts and application**, Ann Arbor Press Inc., Michigan, USA, 1996.

LENARTOVICZ, I. R. **Avaliação da potencialidade do Laser Scanner Terrestre no monitoramento de estruturas: Estudo de caso UHE Mauá**. 125 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Geomática, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2013.

LICHTI, D. D.; GORDON, S. J.. **Error Propagation in Directly Georeferenced Terrestrial Laser Scanner Point Clouds for Cultural Heritage Recording**. In: FIG WORKING WEEK 2004, Atenas. Disponível em:<https://www.fig.net/resources/proceedings/fig_proceedings/athens/papers/wsa2/WSA2_6_Lichti_Gordon.pdf>. Acesso em: 1 jan. 2017.

LICHTI, D. D.; HARVEY, B. **The Effects of Reflecting Surface Material Properties on Time-of-Flight Laser Scanner Measurements** - Symposium on Geospatial Theory, Processing and Applications - Ottawa, 2002.

LIMA, J. G. dos S. **Utilização de Tecnologia de Varredura à Laser para Obtenção e Identificação de Dados Patológicos de Obras de Concreto de Grande Porte – Estudo de Caso.** Trabalho de Conclusão do Curso. Graduação em Engenharia Civil. Núcleo de Ciências Exatas, Universidade Positivo, Curitiba, 2008.

LUO, Lihui et al. Freeze/Thaw-Induced Deformation Monitoring and Assessment of the Slope in Permafrost Based on Terrestrial Laser Scanner and GNSS. **Remote Sensing**, [s.l.], v. 9, n. 3, p.198-198, 24 fev. 2017. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/rs9030198>. Disponível em: <<http://www.mdpi.com/2072-4292/9/3/198/htm>>. Acesso em: 1 jan. 2017.

MONICO, J. F. G. **Ajustamento e Análise Estatística de Observações Aplicados na Detecção de Deformações.** 97 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1988.

NADAL, C. A.; VEIGA, L. A. K.; SOARES M. R.; FAGGION P. L. **Monitoramento geodésico da barragem da UHE de Mauá utilizando métodos geodésicos que permitem a precisão do milímetro.** In: Comitê Brasileiro de Barragens - Seminário Nacional De Grandes Barragens Foz do Iguaçu – PR, 12 a 14 de maio de 2015.

NASCIMENTO JÚNIOR, J. O. do.; SCHULER, C. A. B; CAVALCANTE, R. B. DE S. **Sistema Laser Scanner:** Simpósio Regional de Geoprocessamento e Sensoriamento Remoto. Aracaju. 2006. 7 p.

OLIVEIRA, R. **Otimização dos pesos das observações geodésicas pelo problema de valor próprio inverso com considerações sobre o planejamento da confiabilidade da observação.** 186 f. Tese (Doutorado) - Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2007.

PARANÁ. CONSÓRCIO ENERGÉTICO CRUZEIRO DO SUL. **Usina Hidrelétrica Mauá.** Disponível em: <<http://www.consorciocruzeirodosul.com.br/>>. Acesso em: 11 maio 2017.

PAVI, S.; BORDIN, F.; VERONEZ, M. R. **O Uso do Laser Scanner Terrestre na Inspeção de Pontes e Viadutos de Concreto:** uma Revisão Bibliográfica. Rio de Janeiro: Vii Congresso Brasileiro de Pontes e Estruturas, 2014. 10 p.

PFEIFER, N.; BRIESE, C., 2007. **Laser Scanning:** Principles and Applications. Áustria: Institute Of Photogrammetry And Remote Sensing, Vienna University Of Technology, 2007. 20 p.

PINTO, J. R. M. **Potencialidade de uso do GPS em obras de Engenharia.** 177 f. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Ciências e Tecnologia, UNESP, Presidente Prudente, 2000.

QUINTERO, M. S.; Bruyne, M.; Poelman, R.; Hankar, M.; Barnes, S.; Budei, L.; Heine, E.; García, J. L. L.; **Theory and practice on Terrestrial Laser Scanning**. Training material based on practical applications. Prepared by the Learning tools for advanced three-dimensional surveying in risk awareness project (3DRiskMapping), Jun. 2008.

REISS M. L.L. **Reconstrução tridimensional digital de objetos a curta distância por meio de luz estruturada**. 256 f. Tese (Doutorado) - Ciências Cartográficas, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Estadual Paulista, Unesp Presidente Prudente. 2007.

RESHETYUK, Y. **Investigation and calibration of pulsed time-of-flight terrestrial laser scanners**. 152 f. Tese (Doutorado) - Curso de Geodesy, Department Of Transport And Economics, Royal Institute Of Technology, Estocolmo, Suécia, 2006.

RIBEIRO, F. C. D. **Proposta de metodologia para verificação da estabilidade dos pilares de redes para monitoramento geodésico de barragens – Estudo de caso**. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo. 2008.

SANTIBAÑEZ, S. A. F. **Avaliação Da Influência Do Modelo De Ajustamento De Observações E Da Densidade De Pontos Laser Scanner Terrestre Para A Representação Paramétrica De Superfícies Planas**. 88 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2010.

SANTOS, André & Amaro, Venerando & Santos, Valdenira. **Laser Escâner Terrestre aplicado ao monitoramento da formação de terraços lamosos em estuário de macromaré, Rio Araguari, Costa Amazônica Brasileira**. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO - SBSR, 25., abr. 2015, João Pessoa-PB, Brasil, Anais XVII: IMPE. CD-ROM.

SANTOS, M. C. S. **Estabilidade das estruturas geodésicas**. 79p. Universidade Federal do Paraná. Setor de Ciências da Terra, Curitiba ,1999.

SCHMITT, A. A. **Spectral analysis and optimization of two dimensional networks**. Geomatics Research Australasia, n. 67, 1997.

SHAN, J.; TOTH, C. K. **Topographic Laser Ranging and Scanning: Principles and Processing**. ISBN: 1498772277. CRC Press; Edição: 2. 2008.

SHEN, Yueqian; LINDENBERGH, Roderik; WANG, Jinhu. **Change Analysis in Structural Laser Scanning Point Clouds: The Baseline Method**. *Sensors*, [s.l.], v. 17, n. 12, p.26, 24 dez. 2016. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/s17010026>. Disponível em: <<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5298599/>>. Acesso em: 1 jan. 2017.

SILVA, A. S.; ROMÃO, V. M.C. **Conceitos em planejamento e otimização de redes para monitoramento de deformações.** Simpósio Regional de Geoprocessamento e Sensoriamento Remoto. Aracaju. 2004. 8 p.

SILVA, B. S. **A Usina hidrelétrica de Mauá e suas dinâmicas socioambientais.** 2015. 272p. Tese (Doutorado). Curso de Pós-Graduação em Sociologia da Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2015.

SILVA, R. N. F. **Avaliação do método de nivelamento trigonométrico, técnica leap-frog, na determinação de recalque em grandes estruturas:** Estudo de caso para a UHE Mauá. 2012. 112p. Dissertação (Mestrado). Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Departamento de Geomática, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2012.

STAIGER, R. **Terrestrial Laser Scanning – Technology, Systems and Applications.** Em: Second FIG Regional Conference, Marrakech, Marrocos, December 2-5, 2003

TOMMASELLI, A. M. G. **Um Estudo sobre as Técnicas de Varredura a Laser e Fotogrametria para Levantamentos 3d a curta Distância.** Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Estadual Paulista, UNESP Presidente Prudente, 2003.

TORGE, W. **Geodaesie**, 2. Aufage, de Gruyter Lehrbuch. Berlin, 2003.

TUCKER, C. T. Testing and Verification of the Accuracy of 3D Laser Scanning Data, in: PROCEEDINGS OF SYMPOSIUM ON GEOSPATIAL THEORY, PROCESSING AND APPLICATIONS, Ottawa, 9-12 jul. 2002. Disponível em: <<http://www.isprs.org/proceedings/XXXIV/part4/pdfpapers/537.pdf>>. Acesso em: 15 maio 2016.

US ARMY, **Gravity Dam Design.** Washington: Engineer Manual, 1995. 88p. Disponível em: <http://www.publications.usace.army.mil/Portals/76/Publications/EngineerManuals/EM_1110-2-1908.pdf>. Acesso em: 10 abril 2016.

VAN GENECHTEN, B; QUINTERO, M. S.; DE BRUYNE, M.; POELMAN, R.; HANKAR, M.; BARNES, S.; CANER, H.; BUDEI, L.; HEINE, E.; REINER, H.; GARCIA, J. L. L.; TARONGER, J. M. B. **Theory and Practice on Terrestrial Laser Scanning:** Training material based on practical applications. Universidad Politécnica de Valencia Editorial. 2008.

WERH, A. e LOHR, U., **Airborne laser scanning – an introduction and overview,** ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, n. 54. 1999.

WOLF, H. Zur Kritik von Schereibers Satz uber die Gewichtsverteilung in Basisnetzen. **Zeitschrift Für Vermessungsweswn.** v.86. 1961.